

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Mikroprocesorově řízený zabezpečovací senzor pracující na
principu vyhodnocování slabých magnetických polí**

Microprocessor-based magnetic sensor for security applications

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Petřek**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2601R004 Měřicí a řídicí technika
Téma: Mikroprocesorově řízený zabezpečovací senzor pracující na principu
vyhodnocování slabých magnetických polí
Microprocessor-based magnetic sensor for security applications

Zásady pro vypracování:

Cílem bakalářské práce je navrhnout zařízení (hardware i software) mikroprocesorově řízeného zabezpečovacího senzoru pracujícího na principu vyhodnocování slabých magnetických polí. Tento senzor bude určen pro montáž do stavebních otvorů (oken a dveří) pro zvýšení jejich bezpečnosti.

1. Analýza současného stavu techniky v oblasti senzorů použitelných pro zabezpečení oken, dveří, krytů apod.
2. Návrh koncepce senzoru na bázi mikroprocesoru dle požadavku zadavatele.
3. Realizace HW části senzoru.
4. Návrh a realizace aplikačního SW senzoru.
5. Ověření funkčnosti a vlastností realizovaného senzoru.
6. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] VAN SICKLE, Ted. *Programming microcontrollers in C*. 2nd ed. Eagle Rock, Calif.: LLH Technology Pub., c2001, 454 s. ISBN 1-878707-57-4.

[2] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *Freescale semiconductor* [online]. 2012 [cit. 2012-02-29].
Dostupné z: <http://www.freescale.com>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 30.4.2014



.....
podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu své práce doc. Ing. Jiřímu Koziorkovi, Ph.D. nejen za cenné rady při zpracování této práce, ale především za pomoc a podporu i v ostatních studijních záležitostech. Přesto největší poděkování patří mé ženě a mým dětem, kteří mi byli při studiu a zpracování bakalářské práce velkou morální oporou, poskytovali mi zázemí a podmínky k dokončení mého studia.

Abstrakt

V bakalářské práci je realizován návrh zařízení (hardware i software) mikroprocesorově řízeného zabezpečovacího senzoru pracujícího na principu vyhodnocování slabých magnetických polí. Pro měření magnetického pole, jež se mění v závislosti na manipulaci s oknem, byl vybrán integrovaný magnetometr s vysokou citlivostí. Hodnoty magnetického pole ve všech třech osách jsou tímto magnetometrem cyklicky měřeny, zpracovány do digitální podoby a následně odesílány ke zpracování mikroprocesoru PIC16. Uživatelské rozhraní je realizováno pomocí dotykových spínačů s akustickým výstupem přímo na zařízení. Zabezpečovací senzor je napájen jedinou 1,5V baterií. Pro účely kalibrace a diagnostiky je senzor vybaven sériovým komunikačním rozhraním s implementovaným komunikačním protokolem. Vytvořená softwarová aplikace v mikroprocesoru zajišťuje obsluhu zařízení, obsluhu magnetometru a komunikaci s PC.

Klíčová slova

Zabezpečovací senzor, Magnetometr, Mikroprocesor, Baterie, Akustický výstup

Abstract

The work implementing design of the equipment (hardware and software) microprocessor-based magnetic sensor for security application operating on the principle of evaluation of weak magnetic fields. For measurement of magnetic field, which varies depending on the manipulation window was selected high sensitive magnetometer. The values of the magnetic field in all three axes are cyclically measured by the magnetometer, converted into digital form and then transmitted, for processing to microprocessor PIC16. The user interface is implemented using touch switches with acoustic output directly on the device. Security sensor is powered by a single 1.5V battery. For the purposes of calibration and sensor diagnostics is equipped with a serial communication interface with implemented communications protocol. Create a software application in the microprocessor ensures operation of the equipment, operation magnetometer and communication with PC.

Key words

Security sensor, Magnetometer, Microprocessor, Battery, Acoustic output

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
U	V	Napětí
I	A	Proud
B	T	Magnetická indukce
F	Hz	Kmitočet

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
HW	Hardware	Elektronické obvody
SW	Software	Programové vybavení
RAM	Read/Write memory	Paměť čtení/zápis
MCU	Microcontroller	Mikrokontrolér
DPS	Printed circuit board	Deska plošných spojů
ME	Mechanic engineering	Mechanický inženýring
CPS	Capacitive modul for control	Kapacitní modul pro ovládní
RX	Receive/Receiver	Přijímat/Přijímač
TX	Transmit/Transmitter	Vysílat/Vysílač
PON	Power on	Zapnutí napájení
Pull up	Resistor for define logic level	Resistor pro definici log. 1
LDO	Low Dropout regulator	Lineární regulátor
ESD	Electrostatic discharge	Elektrostatický výboj
COM	Communication port	Komunikační port
ASIC	Application Specific Integrated Circuit	Integrovaný obvod určen na specifickou aplikaci

Obsah

1	Úvod	1
2	Analýza současného stavu techniky v oblasti senzorů použitelných pro zabezpečení oken, dveří, krytů apod.....	2
3	Návrh koncepce senzoru na bázi mikroprocesoru dle požadavku zadavatele	5
3.1	Senzor obecně.....	5
3.1.1	Základní členění senzorů	5
3.1.2	Měřicí řetězec	5
3.2	Dostupné magnetometry na trhu	6
3.2.1	Magnetometry Honeywell	6
3.2.2	Magnetometry Freescale.....	7
3.2.3	Výběr magnetometru	7
3.3	Systémová koncepce řešení mikroprocesorově řízeného senzoru pracujícího na principu vyhodnocování slabých magnetických polí.....	7
3.3.1	Principy senzorů magnetického pole -- Hallův jev.....	8
3.4	Definice požadavků zadavatele	9
3.4.1	Účel a použití zařízení	9
3.4.2	Systémové požadavky na vyvíjený senzor	10
3.4.3	Testování	11
3.5	Systémová analýza	11
3.5.1	Sensor tool box RD4247MAG3110	11
3.5.2	Měření charakteristiky změny magnetického pole okna při manipulaci	13
3.5.3	Stanovení limitních hodnot manipulace s oknem pro osy X, Y, Z.....	13
3.5.4	Dlouhodobá měření změny magnetického pole v zavřeném okně	14
3.5.5	Automatická korekce offsetu pro nastavení výchozí hodnoty magnetického pole v okolí a čase v řádu hodin	17
3.5.6	Závěry systémové analýzy.....	18
3.6	Definice formálních SW, HW a mechanických požadavků z pohledu systému	18
3.6.1	HW požadavky	18

3.6.2	SW požadavky.....	18
3.6.3	ME požadavky.....	19
4	Návrh a realizace HW části senzoru.....	20
4.1	Návrh Hardware senzoru.....	20
4.1.1	Měření magnetického pole - magnetometr.....	20
4.1.2	Mikrokontrolér (MCU).....	22
4.1.3	Napájecí část.....	24
4.1.4	Akustický výstup.....	25
4.1.5	Kapacitní dotykové ovládání.....	26
4.1.6	Konektory dobíjení, programování a komunikace.....	27
4.1.7	Celkové schéma zapojení senzoru.....	28
4.2	Provedení desky plošných spojů (DPS) senzoru a pouzdra součástek.....	28
4.2.1	Provedení desky plošných spojů senzoru.....	28
4.3	PC komunikátor,„USB --- UART“.....	29
4.3.1	Schéma PC komunikátor,„USB <-> UART“.....	29
4.3.2	Deska plošných spojů - PC komunikátor,„USB <-> UART“.....	30
4.4	Mechanické provedení senzoru.....	30
5	Návrh a realizace aplikačního SW senzoru.....	32
5.1	Návrh aplikačního SW senzoru - SW inženýring.....	32
5.1.1	Architektura navrhovaného aplikačního SW.....	32
5.2	Požadavky na aplikační SW senzoru.....	33
5.2.1	Vývojový diagram chování SW.....	34
5.2.2	Automatická kalibrace senzoru.....	35
5.2.3	Parametry a diagnostická data senzoru v EEPROM paměti.....	37
5.2.4	Produkční mód a komunikace senzorem.....	38
5.2.5	Diagnostika.....	40
5.2.6	Programování v jazyce C.....	40
5.2.7	Zdrojové soubory projektu v jazyce C.....	41
5.2.8	Vývojové prostředí MPLABX a debugger ICD3.....	42
6	Ověření funkčnosti a vlastností realizovaného senzoru.....	44
6.1	Testování HW senzoru.....	44
6.2	Testování aplikačního SW senzoru.....	45
6.3	Systémové testování senzoru.....	46

6.4	Shrnutí výsledků testů	46
7	Zhodnocení dosažených výsledků	47
	Použitá literatura	48
	Seznam příloh.....	49

1 Úvod

Bezpečnost a zabezpečení nejen domova, ale i jiných budov je v dnešní době velmi aktuální téma. Podle statistik je neoprávněné vniknutí prostřednictvím nezabezpečeného okna častým způsobem jak se neoprávněná osoba může dostat dovnitř uzavřeného objektu. Dodavatelé oken nabízí různá řešení jak zvýšit bezpečnost svých oken. Velmi často se jedná o speciální kování, nerozbitná skla, či jiné mechanické ochrany. Někteří dodavatelé nabízí složité zabezpečovací systémy, jejichž součástí někdy bývají i různé varianty skrytých bezpečnostních spínačů instalovaných v okně, které jsou následně kabeláží připojeny k vlastnímu bezpečnostnímu systému. Tyto řešení bývají často nákladné, vyžadující instalaci kabeláží popřípadě je nutná další stavební připravenost.

Autonomní senzor na principu vyhodnocování slabého magnetického pole má potenciál výrazně zvýšit bezpečnost okna, upozorněním na neoprávněnou manipulaci s oknem. Vzhledem k tomu, že pracuje nezávisle na jakémkoliv nadřazeném systému, je napájen z vlastního zdroje a je skrytý ve slepé části okna, není jej jednoduché vyřadit z provozu obvyklými způsoby, především odpojením napájení či komunikace s nadřazeným systémem. S ohledem na to, že pracuje na principu cyklického vyhodnocování dovozené či nedovozené změny slabého magnetického pole, včetně pole geomagnetického, není jednoduché jej vyřadit simulací podmínek zavřeného okna. Své uplatnění může nalézt téměř v každém typu vyráběného okna, také proto, že ctí rozměrové standardy slepých částí okenních křidel, která jsou primárně určeny pro montáž kování.

Tato bakalářská práce si klade za cíl vyvinout mikroprocesorově řízený zabezpečovací senzor pracující na principu vyhodnocování slabých magnetických polí. Elektronické obvody, software, mechanické provedení, tak aby senzor plnil svoji funkci. Velmi důležitou součástí bakalářské práce je také závěrečné testování senzoru.

2 Analýza současného stavu techniky v oblasti senzorů použitelných pro zabezpečení oken, dveří, krytů apod.

Senzory jako zdroje primárních informací o reálném světě jsou klíčovým elementem prakticky všech regulačních a měřicích systémů. Výběr senzorů zásadně předurčuje koncepci celého systému a významně podmiňuje úspěch řešení úkolu. V současné době se odhaduje počet typů senzorů na několik desítek tisíc.[3]

V současné době jsou u zabezpečovacích zařízení pro zjišťování uzavřeného nebo jiného stavu oken používány především mechanické kontakty či magnetické senzory s protikusem, které bývají kabeláží napojené na další zařízení zpravidla mimo sledované okno. Toto řešení vyžaduje zpravidla napájení energií z externího zdroje umístěného mimo sledované okno. Navíc naprostá většina doposud známých zařízení plní svou funkčnost pouze při nutnosti komunikace tohoto zařízení s dalším systémem.

Také jsou známy senzory či celá zabezpečovací zařízení pro zjišťování uzavřeného nebo jiného stavu okna, na principu vyhodnocování magnetického pole způsobené změnou polohy křídla okna. Nevýhodou těchto řešení je, že v naprosté většině těchto případů není zabezpečovací zařízení na principu vyhodnocování magnetického pole autonomní a musí být taktéž připojeno kabeláží k nadřazenému systému, který bývá umístěn mimo hlídané okno. Takové zařízení je mnohem jednodušší vyřadit z provozu. Další velkou nevýhodou těchto řešení je nutnost použití protikusu umístěného v blízkosti magnetického senzoru. Tento protikus bývá zpravidla z permanentně magnetického materiálu. Navíc taková zařízení se mohou velmi často snadno uvést mimo funkci použitím dalšího permanentního magnetu. V neposlední řadě je velkou nevýhodou, že u autonomních zabezpečovacích zařízení na principu vyhodnocování magnetického pole, které nemají přívodní kabely a jsou napájeny z vlastního zdroje energie, je velikost tohoto zařízení zpravidla zabraňující instalaci tohoto přímo ve vnitřní slepé drážce okna či distančním rámečku skla okna, tak aby bylo zajištěno skrytí tohoto zařízení.

Základní rozdělení běžně používané techniky senzorové techniky pro zvýšení bezpečnosti okna:

1. Mechanický spínač, skrytý i neskrytý rozpínaný kontakt – používá se vždy pouze jako součást vyššího systému pro zabezpečení budov. Je jednoduchý a používá se v zabezpečovací technice oken již dlouhou dobu. Jeho výhodou je nízká cena, ale zásadní nevýhodou je nutnost kabelového připojení na vyšší systém.

2. Magnetické

V dnešní době se významným způsobem využívají senzory na principu magnetického pole. Jedna z hlavních výhod magnetických senzorů je nižší opotřebávání dlouhodobým užíváním.

- a. Neskryté – namontovány na viditelné části okna

1. Neautonomní – nutnost připojit na vyšší systém z důvodu řízení a ovládání, především, drátově připojené, popřípadě bezdrátově připojené. Nejčastěji umístěno přímo na viditelnou část okenního nebo dveřního křídla – případně narušitel může zařízení vidět, dále neestetické



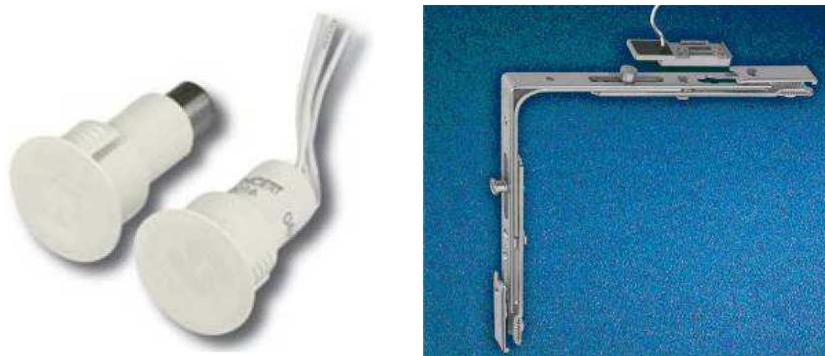
Obrázek.1: Magnetické senzory, neskryté, neautonomní [10]

2. Autonomní – nejsou připojeny na vyšší systém z důvodu vyhodnocování a napájení, jejich mechanické provedení nedovoluje jejich umístění do skryté části okna, možná provedení vidíme na obrázku 2.



Obrázek.2: Magnetické senzory, sady, neskryté, autonomní [10]

- b. Skryté – namontovány ve slepé části okna
1. Neautonomní – nutnost připojit na vyšší systém z důvodu vyhodnocování a napájení, nutná kabeláž – přizpůsobené rozměry nejčastěji přímo součástí kování okna, možná provedení vidíme na Obrázku 3 a 4.



Obrázek.3: Magnetické senzory, skryté, neautonomní [11]



Obrázek.4: Magnetický senzor, skrytý, neautonomní [11]

2. Autonomní – nepřipojeny na vyšší systém – vlastní ovládání – vlastní zdroj energie – senzory tohoto typu nejsou zatím k dispozici. Návrh takového senzoru je náplní této práce.

3 Návrh koncepce senzoru na bázi mikroprocesoru dle požadavku zadavatele

Jak již bylo naznačeno v předchozí kapitole, senzorová problematika je velmi rozsáhlá. Existuje opravdu mnoho typů senzorů. V této kapitole bude rozepsaná obecná problematika senzorů. Senzor jako primární zdroj informace snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a dle určeného definovaného principu ji transformuje na měřicí veličinu – nejčastěji na veličinu elektrickou.[3] Popřípadě je tato elektrická veličina převedena na číslcový signál.

3.1 Senzor obecně

3.1.1 Základní členění senzorů

Senzory lze dělit do mnoha různých skupin, podle:

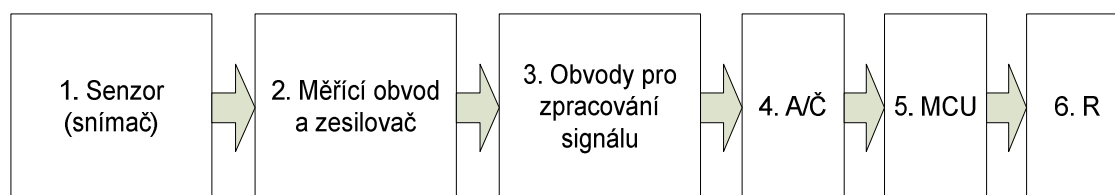
- měřené veličiny
- fyzikálního principu
- styku senzoru s měřeným prostředím
- transformace signálů
- výrobní technologie [3]

Dále senzory rozdělujeme do dvou základních skupin z pohledu působení snímané veličiny:

- **Aktivní senzor** je senzor, který se působením snímané veličiny chová jako zdroj elektrické energie.[3]
- **Pasivní senzor** – je senzor, u kterého je nutné elektrickou veličinu (indukčnost, kapacitu, odpor, imitaci) dále transformovat na analogový napěťový nebo proudový signál.[3]

3.1.2 Měřicí řetězec

Na obrázku níže je základní schéma měřicího řetězce. Jako první je ve schématu uveden snímač. Tento snímač realizuje vlastní převod měřené veličiny. Následuje blok zesilovače, který musí zajistit příslušné zesílení. Po zesílení signálu je potřeba signál zpracovat, například velmi často linearizovat v obvodech pro zpracování signálů. Takto zpracovaný signál se následně převede na číslcovou informaci, která je zpracována mikropočítačem. Takto zpracovaná data jsou dále odesílána následně do nadřazeného systému.



Obrázek.5: Základní schéma měřicího řetězce [3]

V konkrétních případech se může tento měřicí řetězec lišit dle potřeby aplikace. V následující kapitole bude popsán měřicí řetězec senzoru, jež je obsahem této práce. Nicméně principy zůstávají stále stejné.

3.2 Dostupné magnetometry na trhu

Vzhledem k tomu, že vývoj a výroba kvalitního magnetometru s číslicovým výstupem není jednoduchá záležitost, tak není mnoho seriózních výrobců, kteří magnetometry dle níže uvedených požadavků nabízejí.

Hlavní požadavky na magnetometr:

- Měření magnetického pole ve všech třech osách X, Y, Z
- Maximální rozměry 6x6x2mm
- Citlivost min. 0.1 μ T
- Měřicí rozsah $\pm 2000\mu$ T
- Číslicový výstup
- Napájecí napětí 3,3V
- Spotřeba při vzorkovacím kmitočtu měření 0,3Hz max. 50 μ A
- Nízká cena

I když nízká cena je uvedena jako poslední bod, tak v praxi se často stává, že je tento aspekt naprosto klíčový pro celý projekt. Z inženýrské praxe vidíme, že je nezbytné, aby po technické stránce bylo vše v pořádku, ale klíčový parametr je stále „design to cost“ (vývoj s ohledem na co nejnižší náklady). Často je vidět tento přístup, především v oblasti automotive, ale i v jiných oborech s velkým počtem opakování výroby, že další vývojové cykly projektu se zaměřují pouze na možné úspory, tak aby v zařízení nebyly použity například zbytečně součástky s parametry, které nejsou vyžadovány, a tím se celý výrobek zbytečně neprodražoval. Z tohoto pohledu je vhodné tento aspekt pohledu na vývoj zakomponovat přímo do první verze generického vývoje, předejde se tím mnoha komplikovaným situacím v budoucnosti při dalších revizích projektu.

3.2.1 Magnetometry Honeywell

Senzory magnetického pole od společnosti Honeywell jsou jedny z nejcitlivějších senzorů v oblasti senzorů pro slabá magnetická pole. Tyto senzory jsou navrženy pro přesné měření směru a intenzity magnetického pole. Mezi nabízenými senzory magnetického pole od společnosti Honeywell můžeme najít magnetometry i přímo aplikace jako například kompas. Nabídka magnetometrů s různými vlastnostmi je opravdu velmi široká.

Senzory s vysokou citlivostí:

HMC1001 1-osa

HMC1002 2-osy

Senzory s širokým lineárním rozsah (± 6 gauss)

HMC1021S 1-osa (SOIC)

HMC1021Z 1-osa (SIP)

HMC1021D 1-osa – Pro vysoké teploty

HMC1022 2-osy

Senzory s širokým lineárním rozsahem v malém provedení:

HMC1041Z 1-osa

HMC1043 3-osy

HMC1051Z 1-osa

HMC1051ZL 1-osa

HMC1052L 2-osy

HMC1053 3-osy

HMC1501 1-osa

HMC1512 2-osy

Senzory s lineárním módem pro použití v kompasu:

HMC5883L 3-osy, kompas IC

HMC6052 Integrovaný kompasový senzor

HMC6352 Dvouosý kompas včetně algoritmů

HMC6343 Tříosý kompas včetně algoritmů

Bližší informace lze dohledat v příslušném katalogovém listu každého senzoru.

3.2.2 Magnetometry Freescale

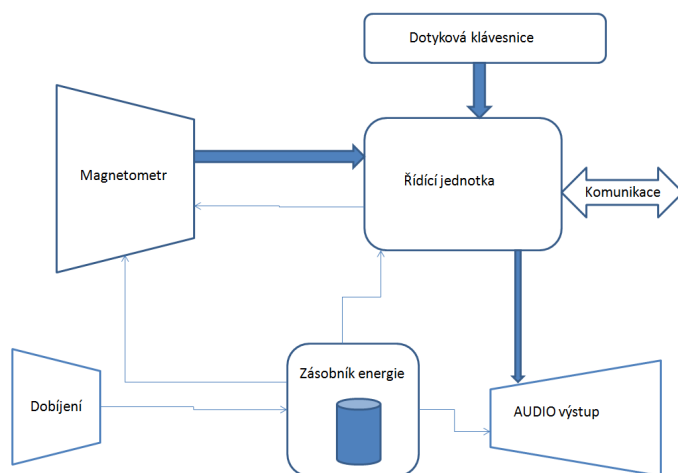
Nabídka magnetometrů od společnost Freescale je výrazně užší. Nicméně nabízí magnetometr MAG3110, který je tříosý, s minimální spotřebou, minimálními rozměry. Bližší informace lze dohledat v příslušném katalogovém listu.

3.2.3 Výběr magnetometru

Po zhodnocení všech požadovaných technický kritérií, a to: požadavek na měření ve všech třech osách, vysoká citlivost, minimální spotřeba, rozměry, digitální rozhraní zůstalo z nabídky Honeywell již málo vyhovujících typů. Pokud detailně porovnáme nabídku Honeywell a Freescale dojdeme k tomu, že MAG3110 má navíc garantovanou minimální spotřebu, která při snímání 128 vzorků ve frekvenci 0,3Hz je pod 34uA. Žádný z nabízených magnetometrů od Honeywell negarantuje tak nízkou spotřebu. Taktéž v neposlední řadě kritérium ceny potvrdilo výběr MAG3110 jako nejvhodnějšího obvodu pro řešenou aplikaci. Podrobnější informace jsou k dispozici v katalogovém listu MAG3110, který je součástí příloh.

3.3 Systémová koncepce řešení mikroprocesorově řízeného senzoru pracujícího na principu vyhodnocování slabých magnetických polí

Principem tohoto řešení, je měření a vyhodnocení změny magnetického pole způsobené změnou polohy křídla okna bez nutnosti použití protikusu z permanentně magnetického materiálu, s využitím vlastního autonomního zdroje energie. Celé zabezpečovací zařízení je umístěného ve slepých částech okna.



Obrázek.6: Základní koncepce - Mikroprocesorově řízený zabezpečovací senzor pracující na principu vyhodnocování slabých magnetických polí

Na obrázku výše je základní blokové členění senzoru. Vzhledem k tomu, že zařízení je velmi citlivé na změnu magnetického pole, není možné jej vyřadit použitím dalšího permanentního magnetu. V případě velmi slabých magnetických polí v okolí okna je zařízení schopno vyhodnocovat polohu křídla okna i pomocí změny natočení vůči geomagnetickému poli Země. Nicméně velmi často jsou v okolí okna zdroje permanentních magnetických polí (kovové části budov, instalace, kovové zařízení místností a podobně.) Zařízení je vybaveno autonomním zdrojem energie, jedinou baterií AAA, kterou lze dobít. V případě nízkého stavu energie je možné prostřednictvím obvodů dobíjení energii do baterie doplnit. Celé zařízení je autonomní a díky tomu nepotřebuje žádné přívodní kabely. Taktéž velikost zařízení je malá a je umístěno včetně zdroje energie ve vnitřní drážce okna. Dále je senzor vybaven dotykovými ovládacími ploškami pro obsluhu. Taktéž je senzor osazen audio výstupem pro akustickou komunikaci a poplach. Senzor je vybaven obvodů pro komunikaci s vnějším okolím, používaných při nastavování parametrů a prací s diagnostikou. Detailní rozbor obvodového řešení je náplní dalších kapitol.

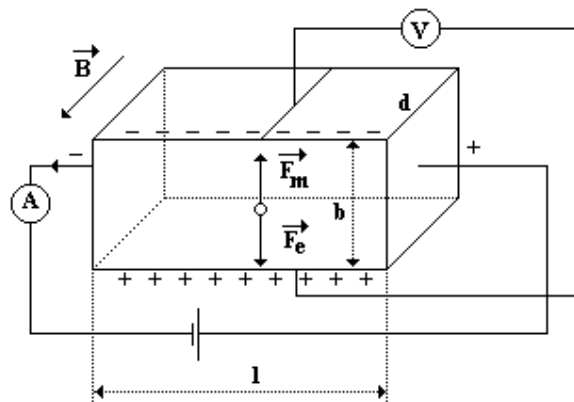
Jako základní měřicí snímač byl vybrán integrovaný magnetometr MAG3110 od společnosti Freescale. Detailní informace lze najít v katalogovém listu výrobce, který je součástí příloh.

3.3.1 Principy senzorů magnetického pole -- Hallův jev

Elektrický odpor vodivých materiálů v pevné fázi je ovlivňován magnetickým polem prostřednictvím různých fyzikálních jevů. Jde především o Hallův jev, vyvolávající změny odporu úměrné $(v \cdot B)^2$, kde v je pohyblivost elektronů a B je magnetická indukce. U kovů je v zanedbatelné a Hallův jev se neprojevuje.

Hallův jev je proces generace Hallova elektrického pole v polovodiči za současného působení vnějšího elektrického i magnetického pole. Důsledkem toho se hromadí na jedné straně látky záporný náboj a na straně druhé náboj kladný. Díky tomu, že póly mají různý potenciál, vzniká Hallovo napětí.[4]

Na následujícím obrázku je znázorněno schéma Hallova jevu, ukazující proud elektronů.



Obrázek.7: Hallův jev – základní princip[4]

Hallovo napětí - vložíme-li vodivou destičku tloušťky d , kterou protéká řídicí elektrický proud I , do magnetického pole s magnetickou indukcí B_y , kolmou na směr proudu, pak ve třetím směru, kolmém na směr proudu a zároveň na směr magnetického pole změříme potenciálový rozdíl U_H . Následkem Hallova jevu vzniká Hallovo napětí:

$$U_H = R_H \frac{IB_y}{d}$$

Hallova konstanta - Součinitel R_H nazývaný Hallova konstanta má rozměr $m^3 A^{-1} s^{-1}$. Umožňuje stanovit typ vodivosti polovodiče (za předpokladu, že známe orientaci elektrického pole a magnetického pole v předmětu). Dá se vyjádřit jako:

$$R_H = -A_H \frac{1}{qn_n}$$

Pro polovodič typu N je znaménko záporné, kdežto pro polovodič typu P je kladné. A_H je tzv. rozptylový faktor. Jeho hodnota se pohybuje mezi 1 (hodnota kovů) a 2 (pro slabě dotované polovodiče je asi 1,17) [4]

3.4 Definice požadavků zadavatele

3.4.1 Účel a použití zařízení

Cílem této práce je navrhnout a zkonstruovat mikroprocesorově řízené měřicí zařízení-senzor, které bude schopno detekovat pomocí měření změny magnetického pole neoprávněnou manipulaci s oknem. Při detekci manipulace bude uživateli poskytnut definovaný čas v řádech sekund na deaktivaci senzoru. V případě neprovedení deaktivace v definovaném čase bude spuštěn intenzivní akustický signál informující o neoprávněné manipulaci s oknem. Senzor by měl pracovat autonomně, bude napájen pouze jednou baterií AAA. Senzor by měl být vybaven dotykovými ovládacími prvky.

Vzhledem k případné analýze chybových či poruchových stavů by senzor měl obsahovat diagnostiku se záznamem základních provozních dat. Senzor je určen pro montáž do některé ze slepých částí okna, z tohoto důvodu by měly být přizpůsobeny konstrukční rozměry senzoru.

Takovýto rámcový popis zařízení a jeho chování by v inženýrské praxi byl naprosto nedostatečný, proto je zvykem definovat zadání mnohem formálněji prostřednictvím požadavků.

3.4.2 Systémové požadavky na vyvíjený senzor

V inženýrské praxi je kvalitní definice požadavků na produkt jedním ze základních klíčů k úspěchu. Ve většině případů na vývoji produktu nebo zařízení pracuje několik různých specializovaných týmů. Velmi často jsou na začátku vývoje definovány jako první systémové požadavky. Tyto požadavky by měly odrážet pokud možno vyčerpávající popis požadovaného zařízení z hlediska systémového chování a dalších parametrů. Často bývají ve větších vývojových týmech z těchto systémových požadavků vytvářeny požadavky pro jednotlivé navazující disciplíny podílející se na vývoji. Obvykle to bývají požadavky na mechaniku, HW požadavky a SW požadavky. Zde jsou definovány globální systémové požadavky:

1. Při otevření křídla okna, popřípadě vyháknutí křídla, by senzor měl být schopen spustit vnitřní časovač před spuštěním akustického alarmu, vyjma polohy křídla „sklopeno“, přičemž při překročení časového limitu tohoto časovače spustit akustický alarm. Při běhu výše uvedeného časovače by mělo být možno dotykovým ovládáním časovač zastavit a senzor uvést do stavu „nezabezpečeno“
2. Senzor by měl pro identifikaci manipulace s křídlem okna využívat změn magnetického pole vůči rámu okna pomocí měření tříosého měření změn magnetického pole. Senzor by měl pracovat autonomně bez vnějšího zdroje energie a řízení.
3. Senzor včetně zdroje energie by mělo být možné jednoduše nainstalovat do slepé části okenního křídla, tak aby jej nebylo možné identifikovat při vnitřním ani vnějším pohledu při zavřeném okně.
4. Senzor by mělo být možné ovládat pomocí dotykových ovládacích prvků.
5. Senzor by měl mít implementován akustický výstup o intenzitě >80db.
6. Senzor by měl mít pracovní rozsah teplot prostředí $-30^{\circ}\text{C} \div +70^{\circ}\text{C}$.
7. Senzor by měl být schopen pracovat v režimu zabezpečeno minimálně 120 dnů na energii jednoho nabití baterie.
8. Senzor by měl mít implementovanu diagnostiku obsahující poslední měření, časové počítadla provozních hodin, počítadla aktivace, deaktivace včetně permanentního záznamu těchto dat pro servisní a diagnostické účely.
9. Senzor by měl být schopen měřit stav baterie a v případě nízkého napětí akusticky upozornit uživatele.
10. V senzoru by mělo být možno nastavit hodnoty některých základních parametrů při jeho výrobě a kalibraci.
11. Senzor by měl mít k dispozici speciální komunikační režim pro účely autorizovaného přístupu k diagnostickým datům a parametrickým datům.

3.4.3 Testování

Testování je v průmyslové praxi samostatný obor. V rámci této práce bude testován každý požadavek definován v předchozím odstavci. Obecně se při testování SW chování sofistikovaných řešení senzorové techniky užívají jako základní nástroj „black box“ testy. Jedná se o testy celého systému jako celku. V některých případech ale nejde tento typ testu aplikovat na všechny požadavky (vnitřní výpočty, zpracování diagnostiky, atd.), v tomto případě pomůže provést „white box“ test. Při „white box“ testu se většinou mikroprocesor nastaví do režimu „debug“, kde je možno chod programu zastavovat podle potřeby a přímo vyhodnocovat stav proměnných v paměti RAM v mikroprocesoru. V praxi platí pravidlo, že požadavky je potřeba definovat takovým způsobem, aby bylo testovatelných „black box“ testem minimálně 85% požadavků. Zbytek požadavků se řeší v nutných případech „white box“ testem. Zvykem je testy provádět takzvaně automaticky, aby bylo možné stejný test opakovat ihned po jakýchkoliv změnách v kódu. Jako jedna z nejčastěji používaných platform pro vývoji senzorové techniky se používá „LabView“ a „Testend“ od společnosti NI. Momentálně je trendem k těmto tradičním testům v technice vestavěných systémů přidat také „modul“ testy, které známe spíše z vývoje klasického SW z vyšších programovacích jazyků. U „modul“ testu je klíčové testovat samostatně všechny SW moduly, ze kterých se skládá aplikace řídící celý senzor, nejčastěji v testovacím prostředí jazyku C. V našem případě budou provedeny většinou „black box“ testy, ověřující celkové chování obvodu. Navíc u senzorové techniky nejde jen o přesné deterministické chování, protože měříme fyzikální veličinu, která není konstantní.

Z tohoto důvodu byly použity postupy se sběrem velkého množství měřených dat a použity některé statistické metody používané v rámci metod „Design for six sigma“. Tyto měření byly použity především pro prvotní fázi systémové analýzy.

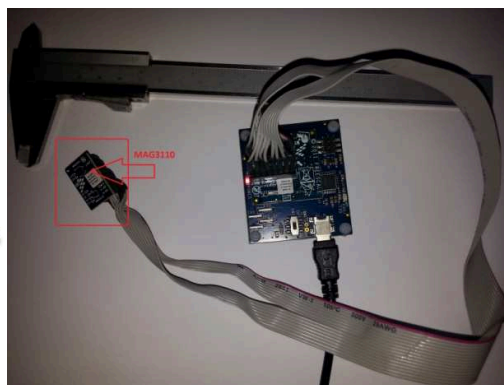
3.5 Systémová analýza

Před vlastním návrhem HW a SW senzoru je potřeba provést systémovou analýzu. Je nutné ověřit, zda je možné identifikovat dle měření změn magnetického pole při manipulaci s oknem jeho jednotlivé polohy. Provést sérii měření změn magnetického pole, tedy naměřit charakteristiky mechanické manipulace s oknem v návaznosti na 3-osé magnetické pole. Provést dovozenou i nedovozenou mechanickou manipulaci s oknem. Z těchto měření definovat dovozené a nedovozené hodnoty pro jednotlivé stavy. Taktéž je potřeba ověřit, zda jsou magnetická pole a jejich změny stejné na jiných typech oken v návaznosti na různá místa instalace v různých budovách.

Vzhledem k tomu, že návrh konečné HW podoby senzoru je pro účely prvních systémových měření velmi pracný, bylo rozhodnuto použít pro tento úkol vývojovou sadu od výrobce magnetometru. Tato vývojová sada nám dovolí poměrně rychle na systémové úrovni sesbírat spoustu dat bez nutnosti řešit HW a SW cílového vestavěného zařízení. V případě magnetometru MAG 3110 je k dispozici SENSOR TOOL BOX RD4247MAG3110.

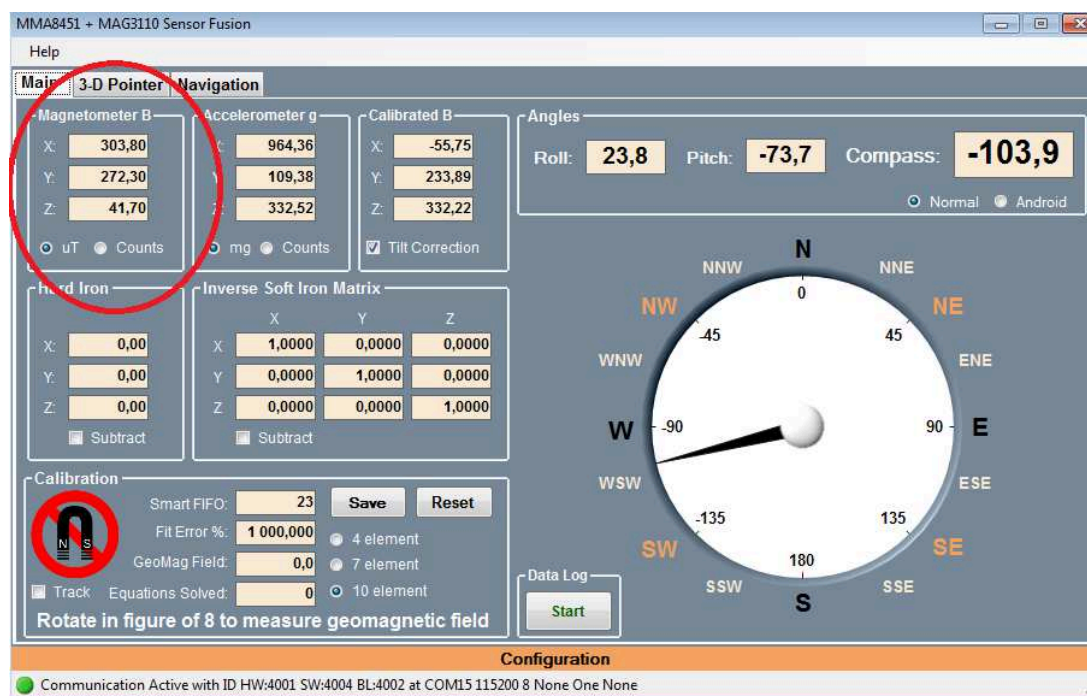
3.5.1 Sensor tool box RD4247MAG3110

Tato vývojová sada je výborným pomocníkem pro předběžná měření.



Obrázek.8: *SENSOR TOOL BOX RD4247MAG3110 + přídatná kabeláž [2]*

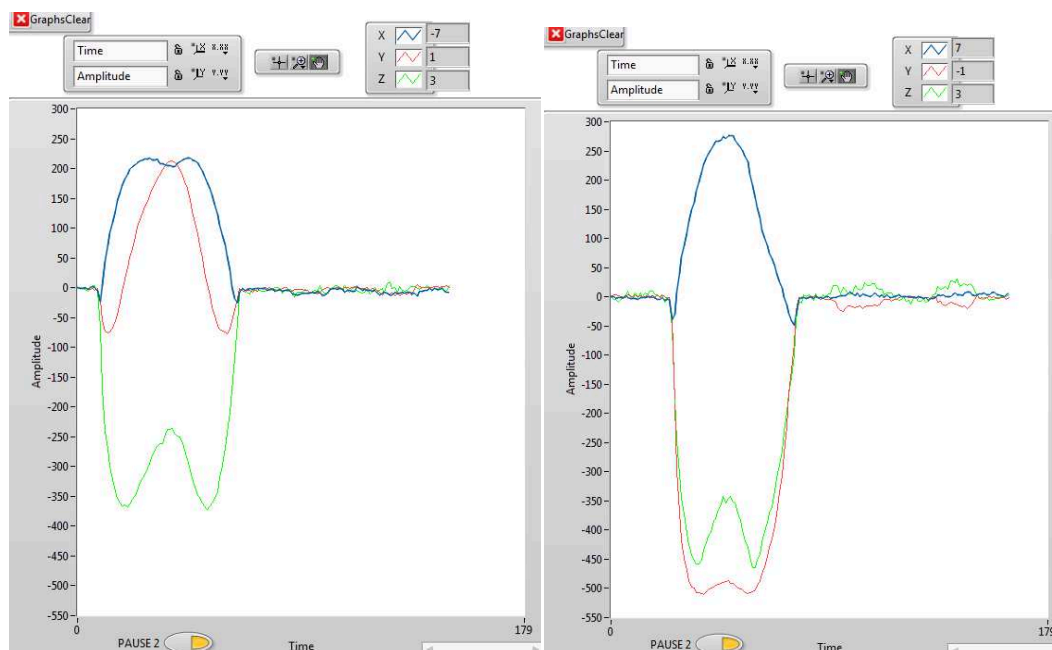
Vlastní měření bylo prováděno přímo umístěním části vývojového sady - malé desky plošných spojů přímo do drážky okna, lze vidět v pravé části na obrázku výše. Z důvodu oddělení desek plošných spojů byla sada doplněna další kabeláží. V levé části stejného obrázku je vyobrazena sestava všech desek vývojové sady. S touto sadou je také dodáván aplikační SW pro PC, který dovoluje poměrně komfortní obsluhu a další zpracování naměřených dat. V levém horním rohu následujícího obrázku lze vidět aktuální hodnoty magnetického pole pro všechny osy X,Y,Z přímo v PC aplikaci od výrobce magnetometru. Velmi podstatná vlastnost této vývojové sady, je možnost odečítání dat sériového přenosu přímo na COM portu PC. Tímto způsobem lze data číst do další aplikace v LabView, kde je mnohem více možností na zpracování, ofsety, a grafické znázornění, než v původní dodávané aplikaci „MMA8451 + MAG3110 Sensor Fusion“, viz obrázek níže.



Obrázek.9: *PC aplikace pro vývojovou sadu SENSOR TOOL BOX RD4247MAG3110*

3.5.2 Měření charakteristiky změny magnetického pole okna při manipulaci

Prvním úkolem bylo měření změn magnetického pole na několika různých oknech při jejich manipulaci – otevření – sklopení (dále jen „charakteristika okna“). Data zpracovávané MAG3110+vývojová sada byly zaznamenávány aplikací v LabView. Na následujícím obrázku vidíme ukázkou dvou charakteristik oken.



Obrázek.10: Charakteristiky průběhu magnetické indukce v závislosti na manipulaci s oknem

Jednotlivé barvy rozlišují jednotlivé osy X – modrá, Y – červená, Z – zelená. Bylo měřeno více než 10 oken, a charakteristika z pohledu amplitud i průběhu se velmi zásadně lišily u každého jednotlivého okna. Tento výsledek byl očekáván, protože většina typů oken je vyztužena ocelovými armaturami, které vytváří permanentní magnetické pole o různých intenzitách i polaritách. Taktéž v moderním stavebnictví je ocel poměrně často používaným materiálem. Velké výkyvy hodnot v grafu jsou charakteristikou pro ZAVŘENO - OTEVŘENO - ZAVŘENO, následující mnohem menší výkyvy jsou charakteristikou pro situaci ZAVŘENO – SKLOPENO – ZAVŘENO. Otevření vždy probíhalo z 0° do 90° a zpět. Sklopení probíhalo do maximální možné polohy sklopení a zpět.

3.5.3 Stanovení limitních hodnot manipulace s oknem pro osy X, Y, Z

Takže, jak můžeme vidět už jen z pouhých dvou ukázek, jsou charakteristiky změny magnetického oken velmi rozdílné. Nicméně pro správnou funkci senzoru potřebujeme, aby senzor, který je instalován v okně, a toto okno je pouze v poloze „sklopeno“ neidentifikoval nepovolenou manipulaci s křídlem. A zároveň, aby senzor byl schopen bezpečně identifikovat manipulaci s oknem do polohy „otevřeno“, a zcela bezpečně tyto dva stavy od sebe rozeznal.

V ideálním případě by bylo nejlepší naměřit pro každé dané okno ve všech třech osách charakteristiku pro otevření i sklopení. Následně limity pro spuštění poplachu určit v pásmu mezi maximální hodnotou v dané ose sklopeného okna, tak aby nikdy nedošlo ke spuštění poplachu při

sklopení okna, ale ideálně tak, aby i při minimálním otevření křídla došlo k překročení této hodnoty. Vždy se jedná o kompromis, protože pokud je hodnota příliš blízko maximální hodnotě při sklopení, tak je senzor velmi citlivý i na minimální otevření, ale hrozí riziko samovolného spuštění senzoru. Naopak pokud je hodnota vysoko nad maximální hodnotou sklopeného okna, tak zcela jistě nedojde k samovolnému spuštění poplachu, ale je otázkou nakolik bude senzor citlivý na neoprávněnou manipulaci otevření. Taktéž zde hrozí riziko, že senzor nespustí poplach při takzvaném vyháknutí okna a jeho úplného sklopení. Protože bylo potřeba stanovit, při jaké hodnotě magnetického pole v každé dané ose X, Y, Z jsou tyto hodnoty limitní pro identifikaci polohy otevřeno, tak jsem stanovil na základě měření a vyhodnocení měření deseti různých oken limitní hodnotu pro identifikaci manipulace s oknem jako:

```
#define MINIMUM_B 40 [0,1 μT]
If(( Bmax_skl * 2) > MINIMUM_B) Limit [0,1 μT] = Bmax_skl * 2;
else Limit [0,1 μT] = MINIMUM_B;
```

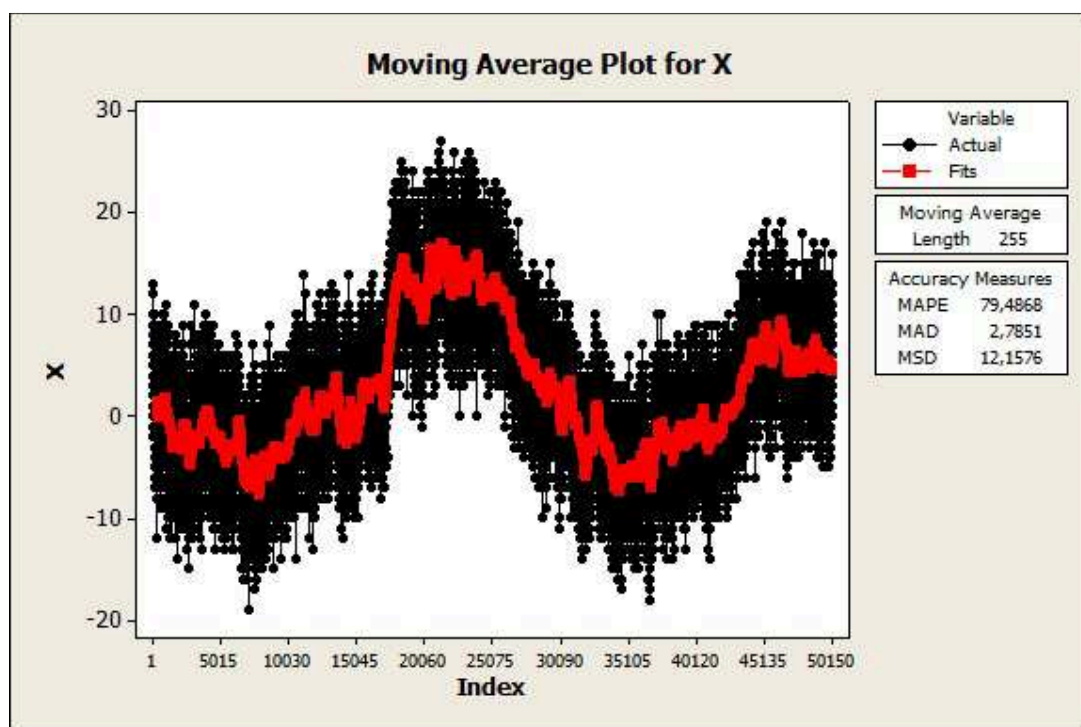
Jednoduše řečeno, limitní hodnota pro identifikaci manipulace s křídlem okna je vždy dvojnásobek naměřené maximální hodnoty v dané ose u polohy „sklopeno“ avšak minimálně 4μT.

Proč 4μT ? Tato hodnota byla určena na základě dlouhodobějších měření magnetického šumu. Při těchto měřeních byl také naměřen jak šum, tak i pomalé periodické změny v magnetickém poli.

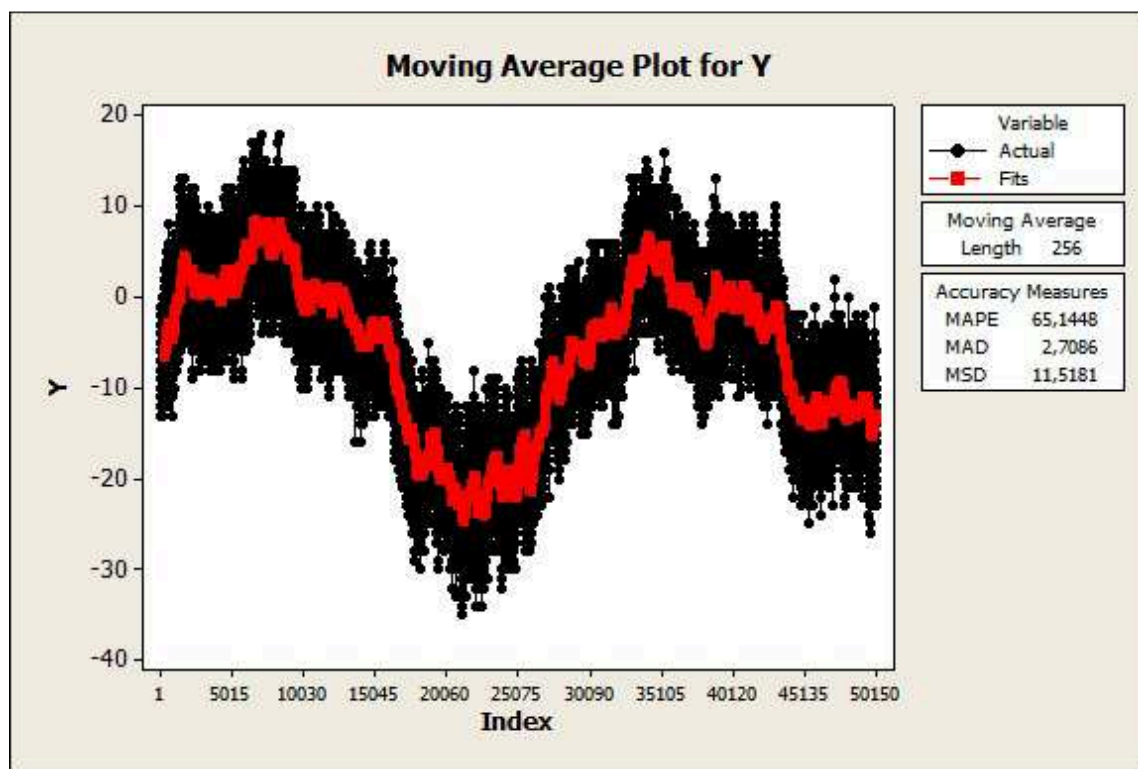
3.5.4 Dlouhodobá měření změny magnetického pole v zavřeném okně

Dlouhodobými měřeními bylo potřeba potvrdit dlouhodobou neměnnost hodnot okolního magnetického pole v zavřeném okně bez jakékoliv mechanické manipulace.

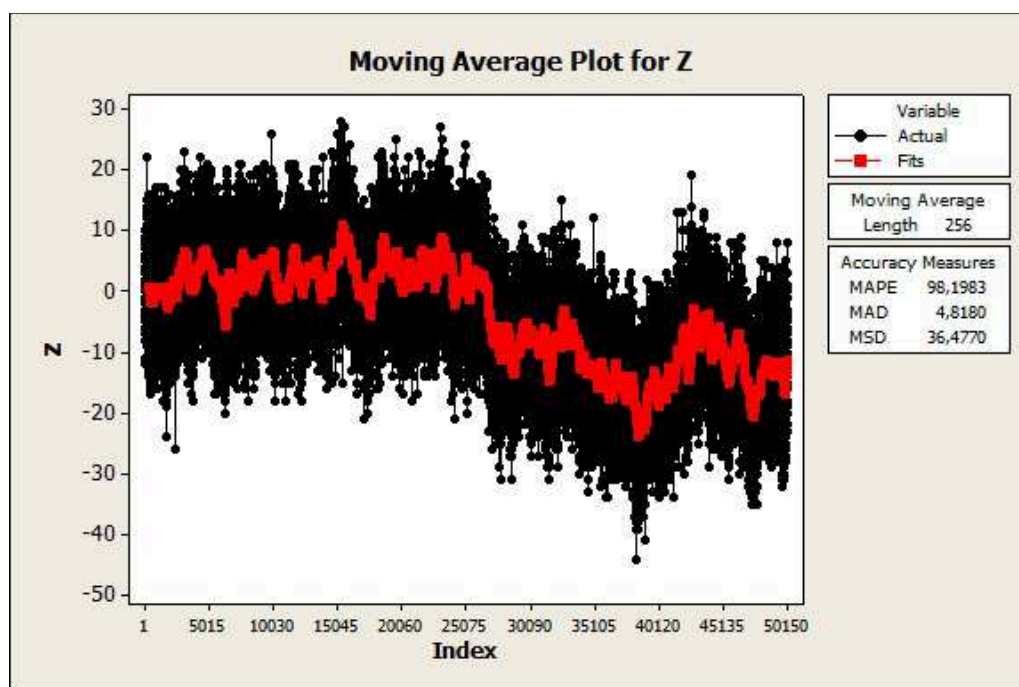
Dlouhodobé měření probíhali v řádu desítek hodin s desítky tisíc diskrétních měření. Na prvních třech obrázcích vidíme měření intenzity změn magnetického pole oproti prvnímu měření, kde dochází k nastavení offsetu senzoru - vynulování všech tří os. Rozlišení amplitudy měření je 0.1 μT na bit. Na posledním obrázku vidíme ukázkou měření osy X – histogram. Pro toto statistické vyhodnocení bylo použito 50150 měření.



Obrázek.11: Dlouhodobé měření změn mag. v zavřeném okně - osa X, f měření = 0,3Hz

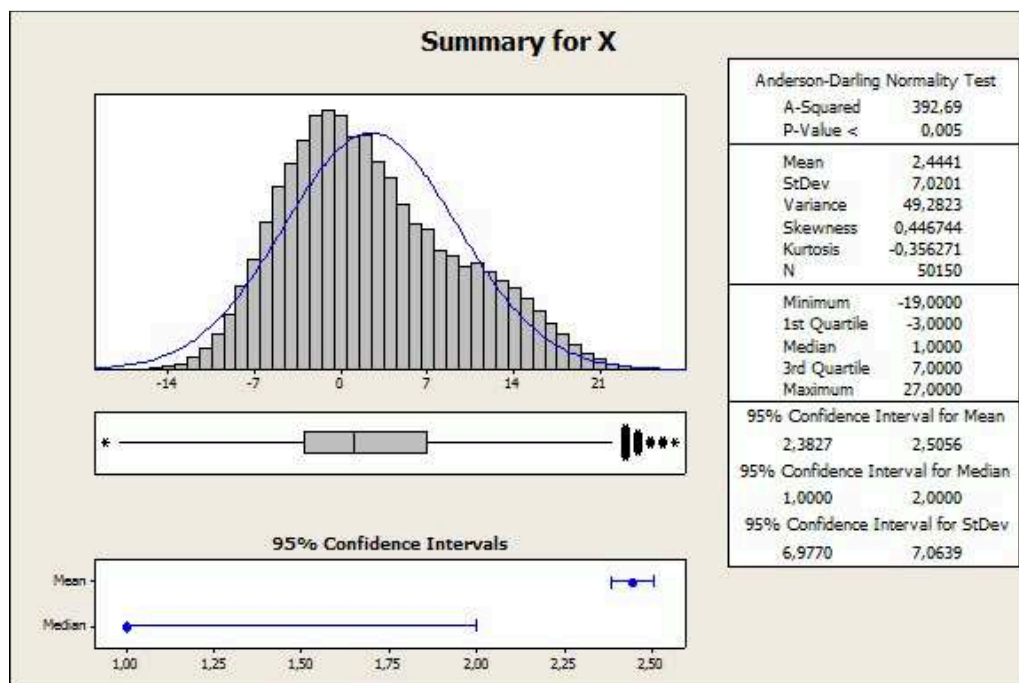


Obrázek.12: Dlouhodobé měření změn mag. v zavřeném okně - osa Y, f měření = 0,3Hz



Obrázek.13: Dlouhodobé měření změn mag. v zavřeném okně - osa Z, $f_{\text{měření}} = 0,3\text{Hz}$

Naprosto zásadním zjištěním bylo, že intenzita magnetického pole v zavřeném okně bez mechanické manipulace není z dlouhodobého hlediska v řádu hodin stabilní (aktuální hodnoty mag.indukce – černé).



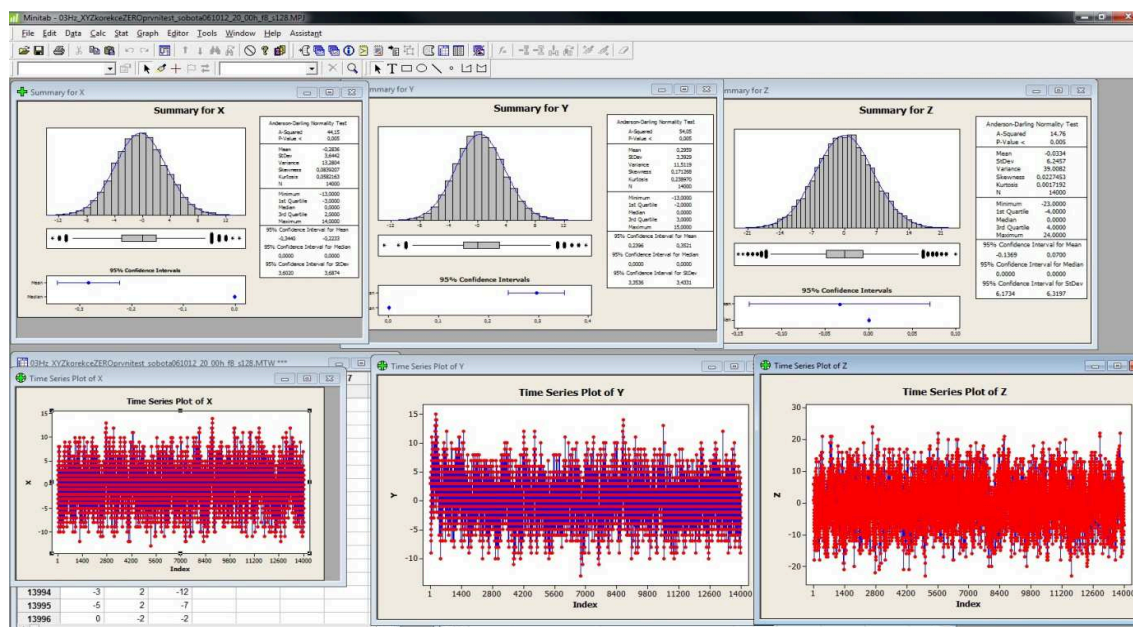
Obrázek.14: Histogram dlouhodobého měření změn mag. pole okolí o ose X

Pokud budeme interpretovat výsledky měření je zcela jisté, že hodnoty poměrně dost „šumí“, až $\pm 2,2\mu\text{T}$, a taktéž se mění průměrná nulová hodnota v čase.

Následně byl implementován výpočet plovoucího průměru pro 256 vzorků. Pokud sledujeme v jednotlivých grafech pohyblivý průměr (červená čára), vidíme zde kompenzován krátkodobý šum, nikoliv však kompenzování dlouhodobých odchylek. Pokud bychom žádným způsobem tento efekt nezohlednili při vyhodnocování překročení limitů pro spuštění alarmu, mohli bychom mít vážné problémy s přesností.

3.5.5 Automatická korekce offsetu pro nastavení výchozí hodnoty magnetického pole v okolí a čase v řádu hodin

Jednoduchý způsob jak tyto dlouhodobé odchylky korigovat je po určitém počtu měření (například 128 x) vždy spočítat průměr a dle tohoto průměru znovu vynulovat X, Y, i Z. Po několika testech s různými hodnotami pro počet průměrovaných měření bylo rozhodnuto, že 128x je hodnota optimální. Cyklus automatické korekce při frekvenci měření je v řádu jednotek minut (6,4 minuty), přičemž z předchozího měření je zřejmé, že dlouhodobější odchylky jsou ve výrazně delších časových úsecích. Při statistickém testování hodnot 64x či 32x nedocházelo k dostatečnému potlačení odchylek jednotlivých průměrů vzhledem k malému počtu měření. Při aplikaci 128x měření bylo dosaženo následujících výsledků:



Obrázek.15: Statistické zpracování kompenzovaných dat – X, Y, Z – 14.000 měření

Jak je již na první pohled vidět, jsou data zbavena dlouhodobých výkyvů a zůstal pouze vliv šumu, který se v mezních hodnotách pohybuje okolo $\pm 2\mu\text{T}$ (červené hodnoty v grafech). Z tohoto důvodu se mi jako statisticky bezpečná zdá absolutní hodnota $\pm 4\mu\text{T}$, tak aby nedocházelo ke spuštění planých poplachů, přičemž dostatečně malá, aby i nevýrazná charakteristika změn magnetického pole

některých oken byla dostačující na překročení hodnoty $4\mu\text{T}$ pro identifikaci neoprávněné manipulace s oknem.

3.5.6 Závěry systémové analýzy

Systémová analýza pomohla odpovědět na základní otázky pro návrh HW a SW senzoru. A to potřebný rozsah, při žádném měření nebylo potřeba více než cca $\pm 500[\mu\text{T}]$. Citlivost senzoru bude naprosto dostatečná, pokud bude $0,1\mu\text{T}$, vzhledem k magnetickému šumu při měření cca $\pm 1,0-2,0\mu\text{T}$. Asi nejdůležitější bylo zjištění dlouhodobé nestability hodnot magnetického pole u zavřeného okna. Byl definován způsob částečné kompenzace této nestability. A v neposlední řadě byl definován algoritmus určení limitních hodnot pro jednotlivé osy. Všechna tato zjištění se budou považovat za další požadavky na návrh HW a SW.

3.6 Definice formálních SW, HW a mechanických požadavků z pohledu systému

Níže je možno vidět formální požadavky z pohledu systému k SW, HW a mechanice. V tomto případě není formální stránka až tak propracována jako bývá obvyklé v inženýrské praxi. Obvykle existují detailně definované procesy navázané na mnoho různých výkonnostních i kvalitativních ukazatelů. V případě této práce jsou definovány tři základní skupiny požadavků dle zaměření HW, SW, ME. Zde jsou jen základní skupiny požadavků, detailní a důkladné zpracování požadavků, tak jak se běžně užívá v průmyslové praxi je nad rámec této práce.

3.6.1 HW požadavky

- napájecí napětí $1\text{V} - 1,6\text{V}$, měnič na 3.3V , $I_{\text{max}} > 150\text{mA}$, ztrátový proud $< 40\mu\text{A}$
- dlouhodobá průměrná spotřeba $< 100\mu\text{A}$ při frekvenci měření min. $0,3\text{Hz}$
- 2x kapacitní spínač
- microUSB - UART + 5V dobíjení
- LED indikátor
- akustický výstup $> 80\text{db}$
- měření magnetického pole ve všech třech osách X, Y, Z
- citlivost min. $\leq 0,1\mu\text{T}$
- měřicí rozsah $\pm 1000\mu\text{T}$
- rozsah pracovní teploty prostředí $-30^\circ\text{C} \div +70^\circ\text{C}$.

3.6.2 SW požadavky

- „STANDARD“ pracovní režim – běžný uživatelský režim, nejčastější režim senzoru
- „DIAGNOSTIKA“ režim – pro kontinuální měření v reálném čase
- „SERVIS“ režim – konfigurace parametrů, vyčítání diagnostických záznamů
- „TEST“ režim – test HW, interní diagnostika, komunikace s testerem
- Obsluha kapacitních spínačů – nízkourovňový driver pro obsluhu spínačů
- Nízký stav baterie – hlídání stavu baterie
- Parametrizace – zapracování parametrů z EEPROM paměti pro ostatní rutiny senzoru
- Autokalibrace – automatické naměření a zpracování limitů pro dané okno
- Autokorekce offsetu načení základní polohy
- „Černá skříňka“ – záznamy o provozu, počítadla, poslední 3 měření, provozní data

-
- Automatický přechod do zabezpečeného stavu po „30“ hodinách

3.6.3 ME požadavky

Vzhledem k tomu, že tato práce je zaměřena na vývoj HW a SW senzoru, jsou požadavky na mechanické provedení zmíněny jen okrajově.

- rozměry senzoru přizpůsobené na šířku drážky pro kování, 16mm -0,2mm
- baterie AAA uchycena přímo na DPS senzoru, nutno respektovat hloubku kovací drážky
- dotykové spínače a piny držáku baterie provedeny z odolných materiálů
- materiál krabičky, plast – ABS – barva bílá
- krabičku i DPS opatřit montážními otvory

4 Návrh a realizace HW části senzoru

Návrh hardware senzoru byl limitován především požadavky na měření magnetického pole, velmi nízkou spotřebou, komunikačním rozhraním, vnějšími rozměry zařízení, ovládacími prvky a počtem součástek – opět návrh z pohledu optimalizace nákladů na výrobek. V následujících kapitolách se budeme věnovat návrhu HW senzoru, provedení jeho desky plošných spojů, základnímu popisu mechanického provedení. Nedílnou součástí hardwarové části tohoto projektu je i pomocný HW pro překlad komunikace mezi USB na straně PC a UART na straně senzoru – vestavěného systému. Tento HW je v provedení malé DPS přímo na USB konektoru pro zasunutí do PC.

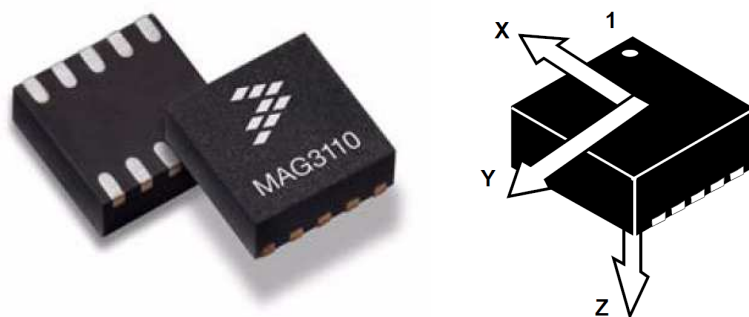
4.1 Návrh Hardware senzoru

4.1.1 Měření magnetického pole - magnetometr

Správný výběr a implementace vhodného provedení magnetometru je pro úspěch projektu naprosto zásadní. Jak bylo již zmíněno, pro realizaci senzoru byl vybrán magnetometr MAG3110 od společnosti Freescale.

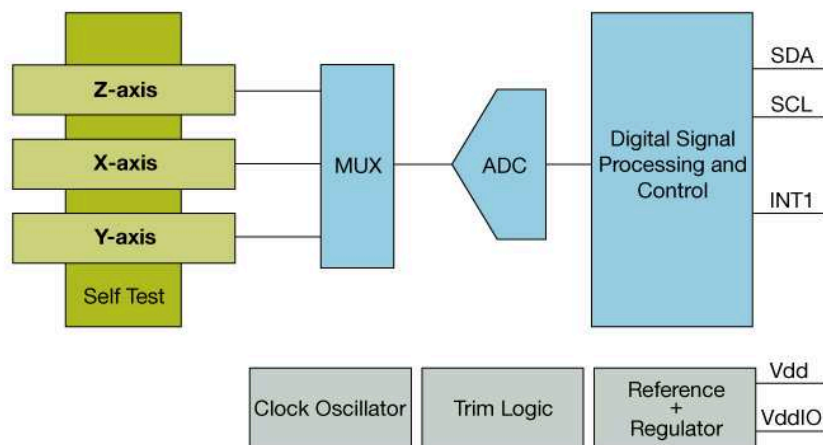
Tento magnetometr se vyznačuje především vysokým rozlišením, nízkým šumem, ultra malými rozměry (2x2mm) a výbornou spotřebou při měření - méně než 24uA.

MAG3110 je 3-osý magnetometr, který může měřit velmi široké rozpětí magnetického pole $\pm 3000\mu\text{T}$ při rozlišení $0,1\mu\text{T}$. Nastavitelný datový výstup, počet vzorků měření, možnost kompenzace výstupu pomocí offset registrů a možnost vyvolání externího přerušení v řídicím MCU dělá z MAG3110 toho správného kandidáta pro tuto aplikaci



Obrázek.16: Horní a spodní pohled na MAG3110, vektory jednotlivých os [2]

MAG3110 Block Diagram

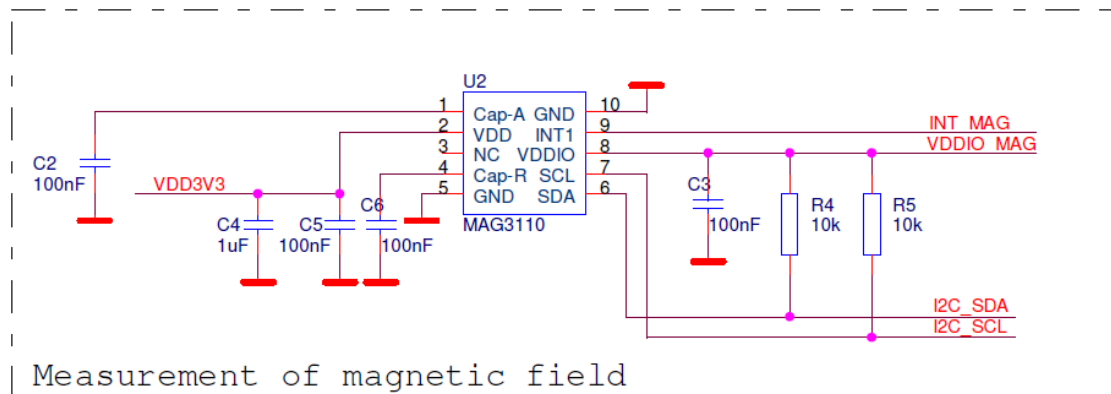


Obrázek.17: Blokový diagram magnetometru MAG3110 [2]

Základní parametry MAG3110:

- Napájecí napětí V_{dd} $1,95V \div 3,6V$
- $1,62 \div V_{dd}$ IO napětí
- Ultra malý $2x2x0,85mm$, $0,4mm$ rozteč pinů, 10-pinové pouzdro
- Citlivost $0,1 \mu T$
- Rozsah $\pm 3.000\mu T$ s možností ofsetu $\pm 1.000\mu T$
- Kmitočet výstupních dat $0,08 \div 80Hz$
- I²C rozhraní, rychlý mód $400kHz$
- Nízká spotřeba ($34,4\mu A$ při $0,31Hz$, 128 vzorků)
- Teplotní rozsah $-40^{\circ}C \div +85^{\circ}C$

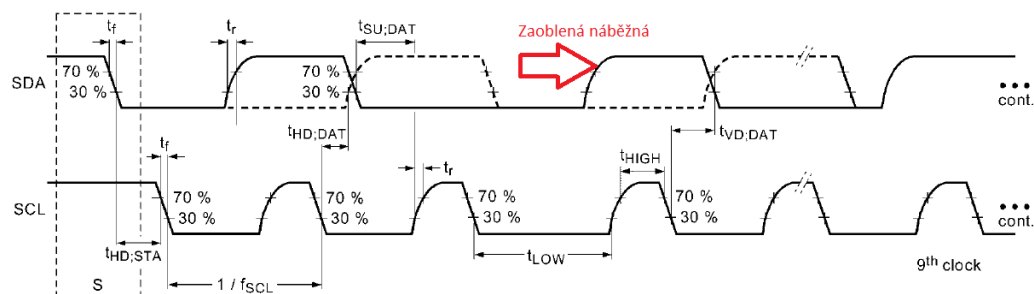
další detailní informace ohledně MAG3110 jsou obsaženy v dokumentaci výrobce.[6]



Obrázek.18: Schéma – měřící blok s MAG3110

Na schématu – zapojení – řízení napájení I2C – odpínání, volba odporů obvykle 4k7, něco o I2C - obrázek

Na obrázku výše je zapojení měřící bloku s MAG3110, které obsahuje sadu blokovacích kondenzátorů C2 až C6 a sběrnici I²C. „Pull up“ rezistor slouží k udržení logické hodnoty 1 na I²C. Výrobce doporučuje hodnoty $4k7 \div 10k$. Nicméně v zařízeních, kde je požadovaná extrémně nízká spotřeba toto může být problém. I při 10k hodnotách rezistoru při napětí 3,3V na sběrnici je proud 660 μ A, což je poměrně vysoká hodnota pro zařízení, které má mít dlouhodobou spotřebu pod 100 μ A. Z tohoto důvodu je napájení I²C zapínáno a vypínáno IO portem z MCU. Tím se zajistí, že takto poměrně vysoké proudy potečou před pull up resistory I²C jen v případě používání této sběrnice. Také bylo zvažováno použití větších hodnot rezistorů, ale to má svá rizika.



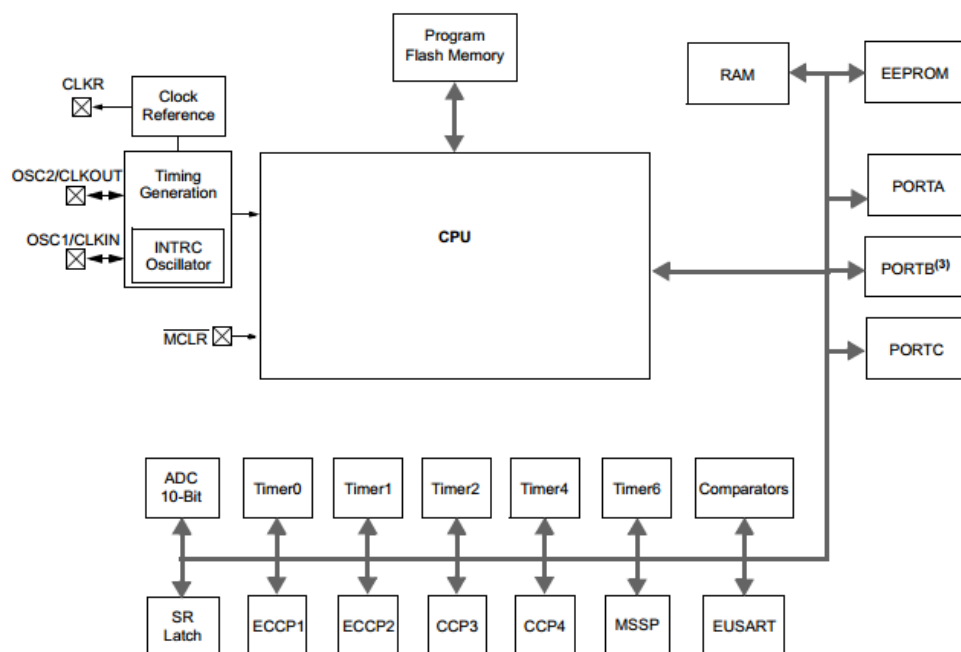
Obrázek.19: Průběhy signálů při I²C komunikaci[6]

Na obrázku výše vidíme naznačeny průběhy signálů při I²C komunikaci. Pokud se hodnoty pull up rezistorů zvýší, dochází k výraznějšímu zaoblení náběžných hran signálu, jednotlivé signály na sběrnici se chovají jako RC článek. Také máme možnost snížit komunikační frekvenci hodin sběrnice, ale to zase prodlouží potřebnou dobu pro napájení sběrnice, takže i když je proud nižší, zase teče déle. Dále je při vyšších hodnotách rezistorů riziko vyšší chybovosti přenosu dat. Jako optimální varianta byla vybrána varianta s maximálními doporučenými hodnotami rezistorů a vypínání napájení sběrnice.

4.1.2 Mikrokontrolér (MCU)

Další velmi důležitou komponentou pro návrh senzoru je MCU, který bude řídit chod celého senzoru. V tomto segmentu je výrazně větší výběr než v oblasti magnetometrů. Pro naši aplikaci bude dostačující poměrně jednoduchý MCU. Jedním z naprosto základních požadavků je velmi nízká spotřeba energie, malé rozměry a samozřejmě podpora všech potřebných HW periférií. Vždy je lepší, když je pro požadovanou funkci v MCU integrovaný konfigurovatelný hardware, než celou problematiku řešit programovou emulací, například UART. Byl vybrán MCU z řady PIC16 od společnosti Microchip. Nicméně na trhu jsou běžně dostupné MCU od společností Freescale, NXP, Atmel a další. Konkrétně byl vybrán poměrně nový typ osmibitový MCU z rodiny nízko-spotřebových „XLP – extra low power“ PIC16LF1829 v QFN pouzdře 4x4x1mm. Jedná se o MCU s klasickou Harvard architekturou, kde pro uložení programu je k dispozici 14kB flash paměti, 1kB RAM operační paměti, 256 byte EEPROM především pro ukládání parametrů a diagnostiky, s výpočetním výkonem cca 8MIPS (milionů operací za sekundu), s HW integrovanými standardními sběrnicemi UART, I2C, dále 10-bitový AD převodník a v neposlední řadě HW podpora pro dotykové ovládací

prvky. Tento MCU má samozřejmě další integrovaný hardware, ale ne všechny bude v naší aplikaci využít. Často bývá komplikované nalézt MCU s optimální kombinací HW podpory, s tím co bude v projektu využito a s tím co je v nabízených „sadách“ periférií nabízeno s ohledem na cenu MCU a vlastní mechanické provedení pouzdra.



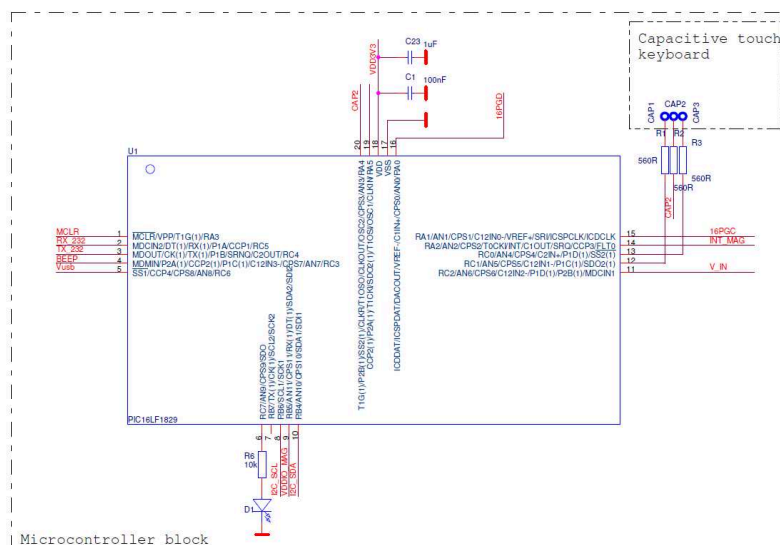
Obrázek.20: Blokový diagram MCU PIC16LF1829[5]

PIC16LF1829 má spoustu dalších vlastností, pro detailní informace je potřeba použít katalogový list.[5] Na obrázku je vidět základní blokové rozčlenění MCU.

Základní parametry PIC16LF1829 relevantní pro tento projekt:

- Integrovaný kapacitní modul „mTouch“
- Napájecí napětí V_{dd} 1,8V ÷ 5,5V
- Flash 14kB
- RAM 1.024B
- EEPROM 256B
- Periferie: UART, I²C
- Časovače 1x 16-bit, 4x 8-bit
- AD převodníky 12 kanálů, 10-bit
- Teplotní rozsah -40°C ÷ +125°C
- Interní oscilátor 32kHz ÷ 32MHz
- Dovolené proudové zatížení I/O portu < 25mA
- Rozšířený „Watchdog“ časovač
- Velmi nízká spotřeba v režimu spánku < 1μA

Další detailní informace ohledně PIC16LF1829 jsou uvedeny v dokumentaci výrobce.[5]



Obrázek.21: Schéma – MCU blok

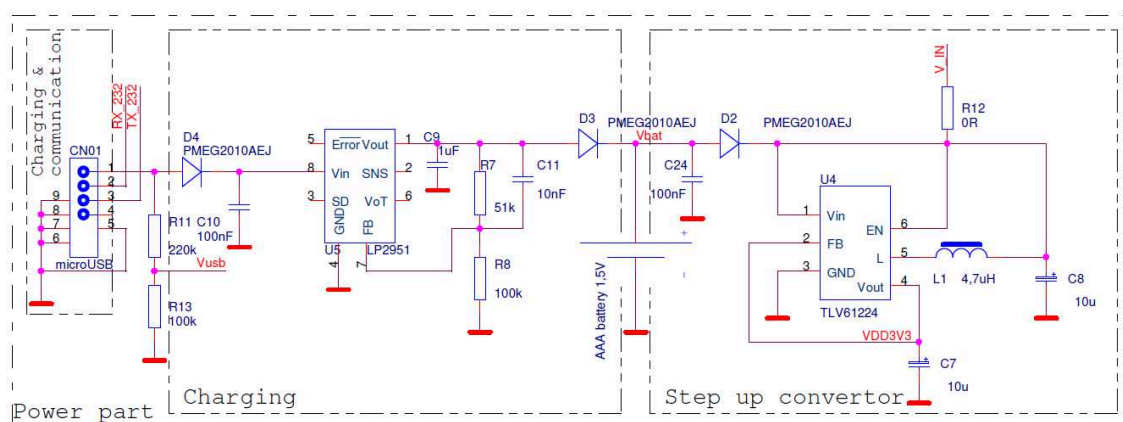
V neposlední řadě je velmi důležitá velikost pouzdra, bylo vybráno provedení QFN 4x4x1 mm. Pro tuto implementaci potřebujeme také MCU s WTD, možnosti SLEEP režimu, velkého rozsahu pracovních frekvencí s interním oscilátorem a další vlastnosti, přičemž tato problematika konfigurační a programové obsluhy bude detailně probrána v kapitole „Návrh a realizace aplikačního SW senzoru“

4.1.3 Napájecí část

Ač se to nemusí na první pohled zdát, tak vyřešit napájecí část tohoto senzoru byl jeden z nejkompikovanějších úkolů. Bylo potřeba zajistit dlouhodobé napájení s proudy v řádu 10 μ A – 100 μ A při stabilizovaném napětí 3,3V pro MCU, přičemž vstupní napětí je dáno pracovním napětím postupně vybíjeného alkalického bateriového článku od 1,6V až po téměř vybitý článek o napětí 0,9V. V první verzi byl vybrán regulátor MCP1640, který měl výborné parametry z hlediska minimálního vstupního napětí a deklarovanou hodnotu ztrátového proudu 19 μ A, což bylo vyhovující. Nicméně při praktických testech bylo prokázáno, že při vstupním napětí 0,9V-1,5V a požadovaném výstupním napětí, nebylo možné dosáhnout nižšího ztrátového proudu než cca 80 μ A, což bylo pro tuto aplikaci nevhodné. Z tohoto důvodu byl vybrán nový regulátor od společnosti Texas Instruments TLV61224. Následnými testy bylo prokázáno, že použití tohoto obvodu je zcela vyhovující naší aplikaci. Ztrátové proudy se pohybovalo okolo 15 μ A i při minimálním napájecím napětí 0,9V. Zapojení TLV61224 je vyobrazeno v pravé části následujícího obrázku.

Dále napájecí část obsahuje blok lineární stabilizace pro napětí 1,65V. Toto napětí je potřeba pro dobíjení alkalické dobíjecí baterie. Protože byla v senzoru použita poměrně málo užívaná alkalická dobíjecí baterie, je možno tuto baterii občas dobíjet použitím standardního adaptéru 5V s konektorem

micro-USB. Dnes je tento standard velmi rozšířen na trhu s mobilními telefony. Pro stabilizaci 1,65V byl použit LDO) LP2951, viz. levá část následujícího obrázku. Výhodou použití LDO je výrazně nižší cena, ale při velké rozdílu napětí se na LDO uvolňuje ztrátový výkon, který je dán součinem proudu a rozdílu vstupního a výstupního napětí. Tím pádem je samozřejmě i mnohem nižší účinnost. Ale v našem případě snížená účinnost pro velmi sporadické dobíjení není problém. Ztrátový výkon je odveden do DPS a vyzářen do okolí.



Obrázek.22: Schéma - Napájecí část

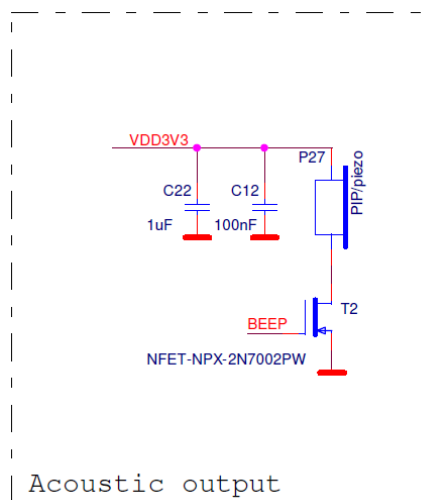
4.1.4 Akustický výstup

Akustický výstup je jediný výstup upozorňující na neoprávněnou manipulaci s oknem. Z tohoto důvodu byl vybrán výkonný piezzo měnič od společnosti LOUDITY LD-BZEN-0903. Vzhledem k mechanickým požadavkům na montáž do slepé části okna, byl vybrán měnič o průměru pouhých 9mm. Tento piezzo měnič dokáže na svém rezonančním kmitočtu 2,73kHz vytvořit akustický zvuk o intenzitě >85db.



Obrázek.23: Foto - PIEZZO měnič v senzoru [8]

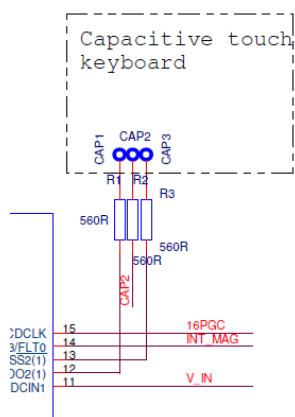
Výše uvedený akustický měnič je řízen MOSFET tranzistorem typu N přímo z MCU. Díky přímému řízení přímo z MCU je možno vytvářet i různé zvuky doprovázející uživatelské ovládání senzoru. Samozřejmě akustická úroveň je na jiném než rezonančním kmitočtu výrazně nižší, což při doprovodných zvucích při obsluze senzoru je spíše výhodou.



Obrázek.24: Schéma – akustický výstup

4.1.5 Kapacitní dotykové ovládání

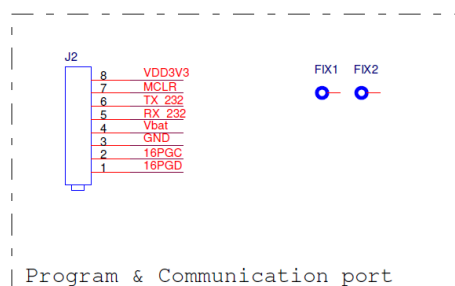
Jako uživatelské rozhraní bylo v senzoru místo klasických mechanických spínačů využito technologie kapacitních spínačů. Výhodou je především vyšší mechanická odolnost v náročných podmínkách okna. Je využito modulu CPS (Capacitive sensing), integrovaného přímo v MCU PIC16. Jak vidíme ve schématu na dalším obrázku, CPS modul v MCU je připojen prostřednictvím ochranných rezistorů (ESD ochrana) k dotykovým ploškám, v našem případě hlavičkám nerezových šroubů, které jsou zašroubovány a tím mechanicky uchyceny přímo do DPS. Jakmile uživatel přiloží prst na tuto plošku, změní se kapacitní podmínky, a tím dojde i ke změně kmitočtu uvnitř CPS modulu. V uživatelském programu je potřeba pamatovat na obsluhu CPS modulu. Jak je vidět ze schématu, vše kromě ochranných rezistorů je integrováno v MCU.



Obrázek.25: Schéma – kapacitní dotykové ovládání

4.1.6 Konektory dobíjení, programování a komunikace

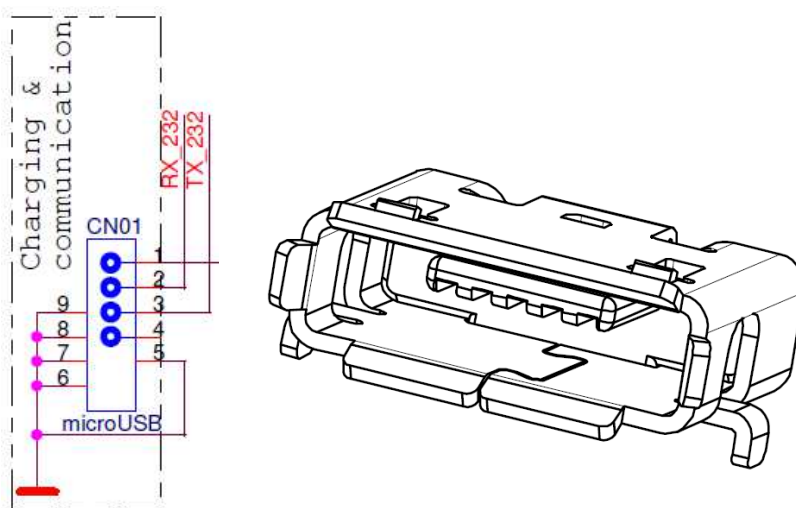
Přímo na DPS senzoru jsou osazeny dva konektory a jeden držák na baterii standardu AAA. Konektor J2 je 8-mi pinová matice kolíků ve standardní rozteči 2,54mm (0,1 palce). Tento konektor je primárně určen na programování MCU a výrobní testy. Jedná se o konektor používaný pouze při výrobě, přičemž osazen je pouze při vývoji. V sériové produkci se obvykle nepředpokládá osazení tohoto konektoru, bývají použity pouze pozlacené kontaktní jehly na pružinách, a to především z důvodu úspory nákladů.



Obrázek.26: Schéma – konektor – programování, komunikace

Konektor CN01 je jediný konektor, který může být používán uživatelem. Mechanické provedení je MicroUSB. Tento konektor je určen především pro dobíjení baterie v pracovním režimu „STANDARD“. Konektorem je taktéž připojena sériová komunikace UART – plný duplex. Může být využit autorizovaným personálem pro podporu následujících pracovních režimů senzoru:

- „STANDARD“ pracovní režim – běžný uživatelský režim, dobíjení
- „DIAGNOSTIKA“ režim – pro kontinuální měření v reálném čase
- „SERVIS“ režim – konfigurace parametrů, vyčítání diagnostických záznamů



Obrázek.27: Schéma – konektor MicroUSB – dobíjení a komunikace [9]

4.1.7 Celkové schéma zapojení senzoru

V předchozích kapitolách byly probrány jednotlivé bloky HW dle jejich funkce. Celkové schéma zapojení senzoru je uvedeno v příloze.

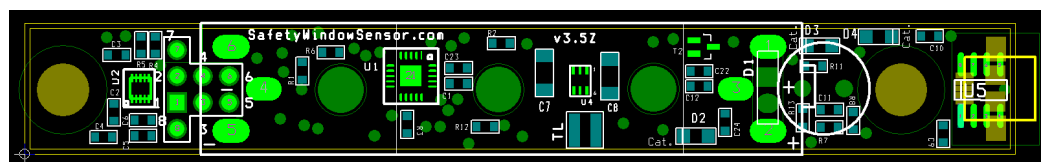
4.2 Provedení desky plošných spojů (DPS) senzoru a pouzdra součástek

Z hlediska HW se nyní budeme věnovat vlastnímu fyzickému provedení. V senzorové technice je velmi častým omezením mechanické provedení v kombinaci s ostatními faktory prostředí, jako jsou vlhkost, teplotní podmínky a podobně. V našem případě jsou použity moderní miniaturní pouzdra jak u integrovaných obvodů, tak i u diskretních součástek.

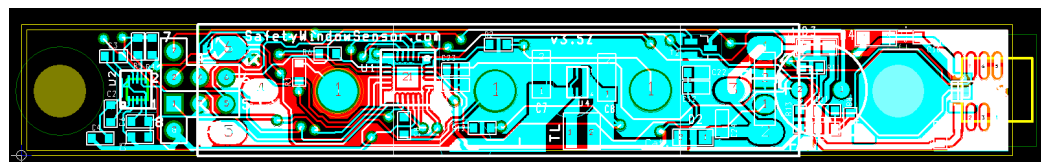
Většina pasivních součástek je v provedení 0603 1,6x0,85x0,45mm. MAG3110 je nabízen pouze v jednom pouzdře a to 10-pin DFN 2x2x0,85mm. Měnič TLV61224 je použitý v provedení 6-pin SC-70 2x2x1mm. MCU PIC16LF1829 je použit v provedení QFN 4x4x0,9mm. Další detailní informace o použitých součástkách lze nalézt v příloze.

4.2.1 Provedení desky plošných spojů senzoru

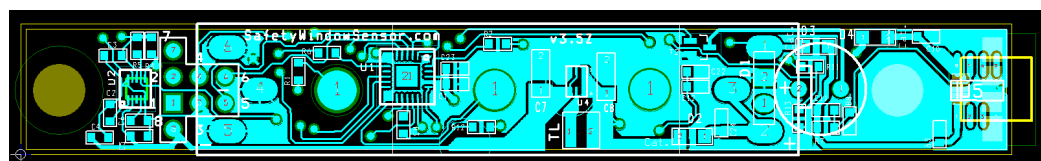
Deska plošných spojů byla zvolena pouze jako dvouvrstvá. Optimální by bylo použít čtyřvrstvou pro lepší rozvedení zemnicí a napájecí plochy. DPS je opatřena nepájivou maskou a povrchovou úpravou jednotlivých pinů pro pájení v provedení AuNi. Desky mohou být vyrobeny vícenásobně na jednom přířezu, přičemž z důvodu dělení může být tento přířez drážkovaný. Takto navržená vícenásobná deska je připravena pro strojní osazování na automatické lince.



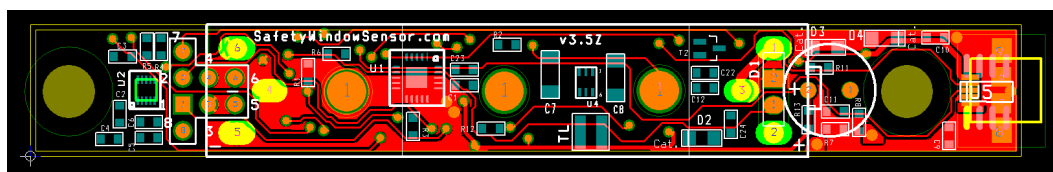
Obrázek.28: Náhled DPS včetně součástek



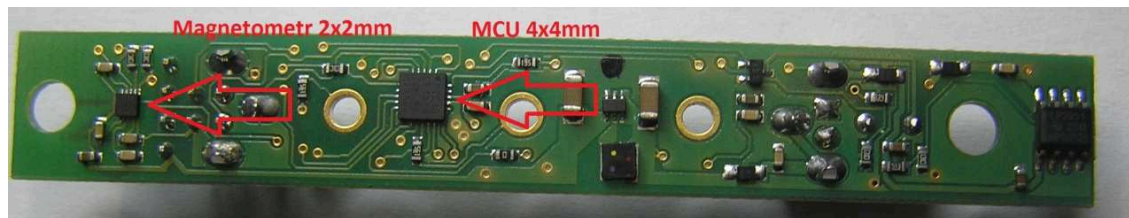
Obrázek.29: Dvouvrstvá DPS – pohled HORNÍ+DOLNÍ vrstva spojů



Obrázek.30: Dvouvrstvá DPS – pohled HORNÍ vrstva spojů



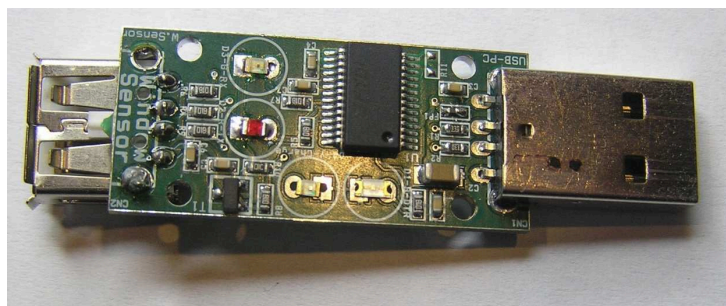
Obrázek.31: Dvouvrstvá DPS – pohled DOLNÍ vrstva spojů



Obrázek.32: Foto - osazená DPS senzoru

4.3 PC komunikátor,,USB --- UART“

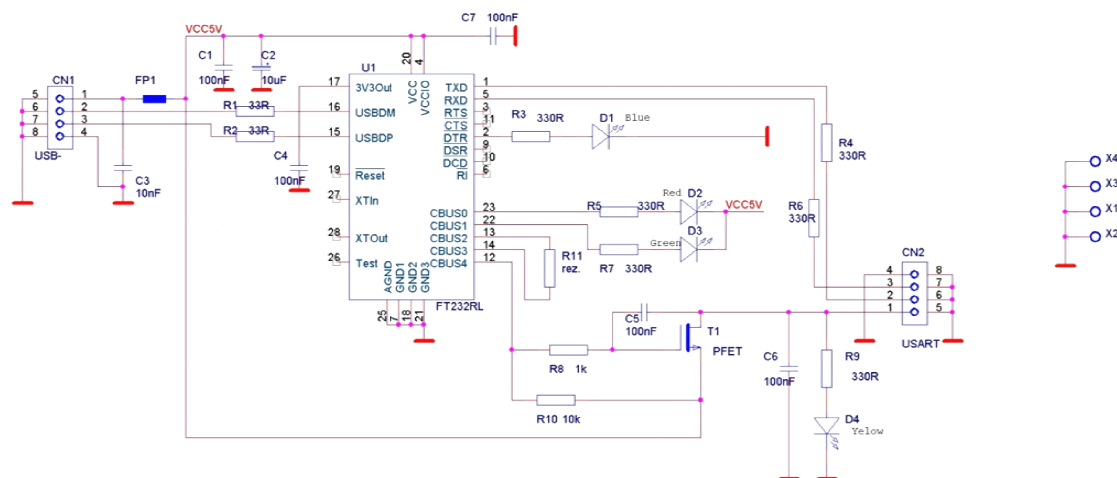
Vzhledem k potřebě komunikace se senzorem z důvodů konfigurace a diagnostiky bylo potřeba vyvinout přípravek, který umožní standardnímu PC komunikovat prostřednictvím COM portu přímo ve standardu UART na napěťové úrovni 3,3V. Zařízení bylo navrženo jako „malý“ interface, přímo na USB konektoru, který se zasouvá do PC. Taktéž napájení je realizováno přímo z PC strany USB. Vyrobený komunikátor je na obrázku níže. Výstupní strana zařízení je osazena taktéž USB, protože pro propojení komunikátoru a senzoru je použit standardní kabel USB-A – USB-micro.



Obrázek.33: PC komunikátor „USB --- UART“

4.3.1 Schéma PC komunikátor,,USB <-> UART“

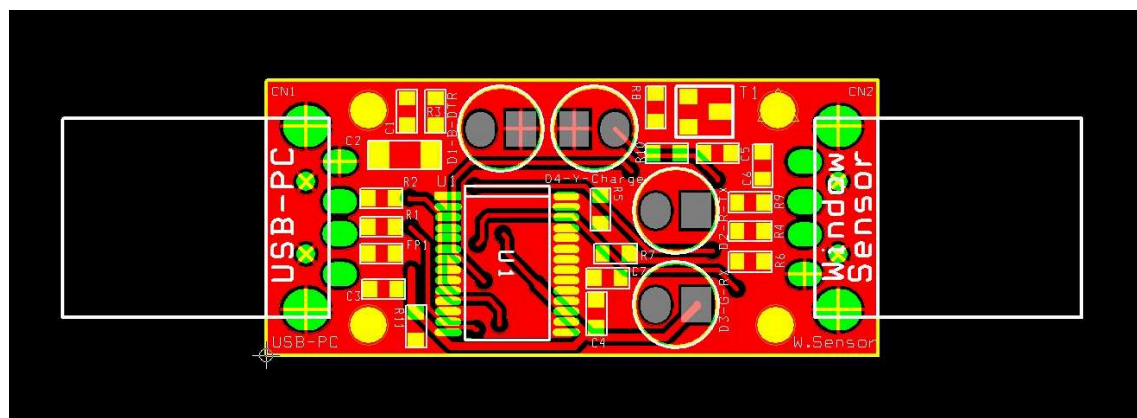
Jádrem celého komunikátoru je obvod FT232RL od společnosti FTDI. Tento obvod zajišťuje konverzi USB na UART standard. Jedná se o speciální ASIC obvod, zajišťující konverzi poměrně komplexní komunikace USB (COM port) na UART. Napájení je realizováno z USB nadřazeného systému. Taktéž je možné pomocí příkazů UART ovládat napájení senzoru, prostřednictvím řízení PFET tranzistoru, který zapíná či vypíná napájení. Jednotlivé LED diody signalizují RX, TX a PON senzoru.



Obrázek.34: Schéma - PC komunikátor,,USB --- UART“

4.3.2 Deska plošných spojů - PC komunikátor,,USB <-> UART“

Deska plošných spojů byla zvolena pouze jako dvouvrstvá. DPS je opatřena nepájivou maskou a povrchovou úpravou jednotlivých pinů pro pájení technologií HAL.



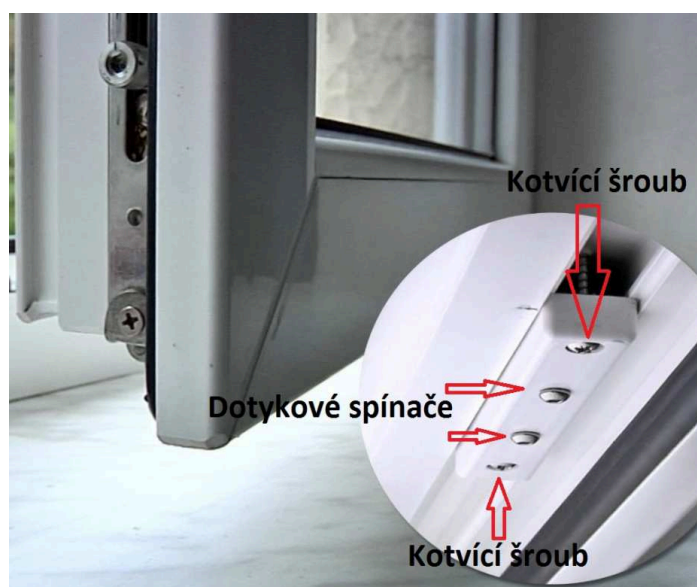
Obrázek.35: DPS se součástkami - PC komunikátor,,USB --- UART“

4.4 Mechanické provedení senzoru

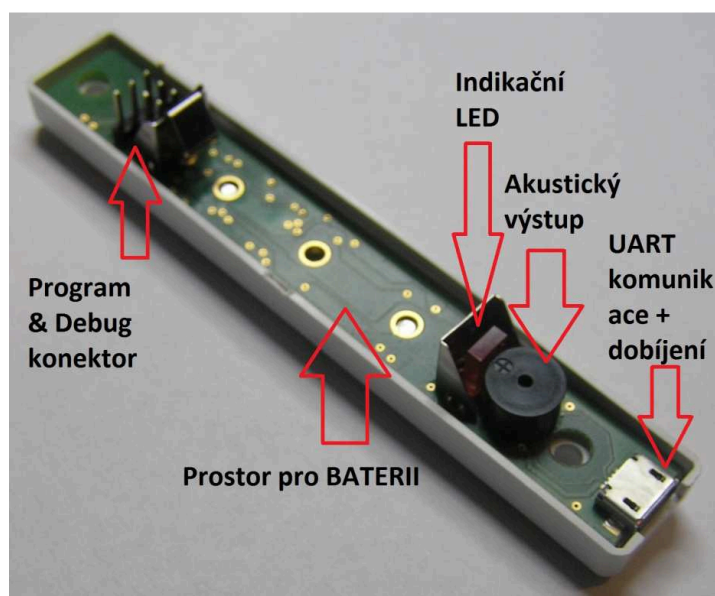
Mechanické požadavky jsou v praxi velmi často limitujícím faktorem pro návrh celého zařízení. Toto platí dvojnásob u senzorové techniky. Senzor je velmi často součástí většího celku a bývá vestavěn do zařízení, na kterém má měření provádět. V našem případě se jedná o běžné, nejčastěji plastové okno. Požadavky na mechanické provedení vychází ze standardů konstrukčních rozměrů oken a dveří. Na trhu existuje mnoho dodavatelů oken, ale v podstatě všichni dodržují standard 16mm široké kovací drážky a stejné výšky uložení křídla a rámu okna. Dále bylo potřeba dodržet umístění baterie přímo na senzoru tak, aby k němu nemuseli vést žádné kabely. Ovládání je realizováno dotykovými spínači, které jsou provedeny nerezovými šrouby s metrickým závitem 3mm

zašroubovány přes plastovou krabičku přímo do děr v DPS. Těmito šrouby je zároveň DPS připevněna do krabičky.

Původně bylo uvažováno o alternativním mechanickém provedení pomocí zalévací hmoty do formy s vloženou DPS, ale narazilo se na problémy s konektory. Základní mechanickou komponentou je krabička vyrobená z plastu. Tato krabička splňuje požadavky na rozměry, pevnost, mechanickou stálost v rozsahu požadovaných teplot, zajišťuje krytí DPS senzoru a poskytuje mechanickou pevnost. Dotykové plochy i šrouby jsou provedeny z nerezového materiálu. Na níže uvedených obrázcích vidíme senzor namontovaný v okně i vlastní mechanické provedení senzoru.



Obrázek.36: Namontovaný senzor v okně



Obrázek.37: Mechanické provedení senzoru

5 Návrh a realizace aplikačního SW senzoru

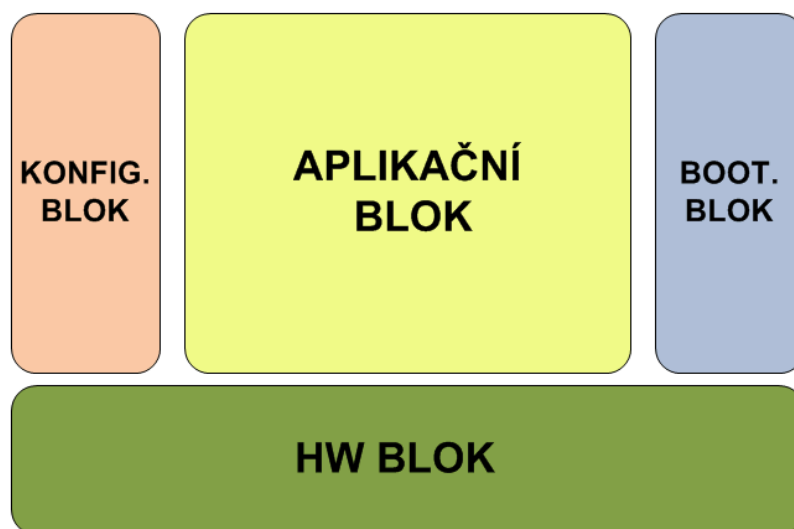
5.1 Návrh aplikačního SW senzoru - SW inženýring

Návrhem aplikačního SW se zabývá obor - SW inženýring, který je sám o sobě poměrně komplexní. Na to, aby mohl vzniknout funkční a použitelný SW produkt, je potřeba nejprve velmi podrobná systémová analýza. V případě vestavěných systémů je z této systémové analýzy nejčastějším výstupem sada požadavků pro jednotlivé disciplíny SW, HW a mechaniku. V případě složitějších projektů se může jednat i o větší počet disciplín, popřípadě o poměrně velkou skupinu jednotlivých požadavků. V předchozích kapitolách byly takové požadavky definovány. Každý takový jednotlivý požadavek by měl být podrobně formálně definován. Mělo by být maximální snahou definovat požadavky tak, aby každý jednotlivý požadavek byl testovatelný jednoznačným opakovatelným testem, nejlépe testem automatickým. Celá tato problematika je složitější, nicméně i v našem případě lze mnoho těchto prvků uplatnit při řešení úkolů vyplívajících z této práce.

5.1.1 Architektura navrhovaného aplikačního SW

Definování vhodné architektury aplikačního SW pro vestavěné systémy je poměrně komplexní problém. Pro napsání podařeného programu určeného pro MCU s využitím programování na vyšší úrovni, musí mít programátor přístup k mnoha různým řídicím a stavovým registrům MCU [1]. Neexistuje jednoznačná odpověď na to, co je vhodná architektura pro všechny typy aplikací vestavěných systémů. Obvykle se používá model několika základních bloků architektury, které bývají uspořádány do několika vrstev s ohledem na účel a rozsah projektu.

- a) HW blok
- b) Konfigurační blok
- c) Aplikační blok
- d) Bootloader blok



Obrázek.38: Základní doporučená architektura SW pro vestavěné systémy

Jako základní se uvádí vrstva často nazývaná HW vrstva. Další podpůrnou vrstvou bývá konfigurační vrstva. A konečně vrstva aplikační, kde bývá implementováno nejvíce funkcionality. Speciální kategorií je bootloader.

HW vrstva zajišťuje rozhraní s vlastním HW MCU, jako například nastavení a obsluha portů, konfigurace oscilátoru, časovačů, přerušení a mnoha dalších potřebných nastaveních v konfiguračních registrech. Vrstva HW také bývá zodpovědná za konfiguraci základních registrů MCU. Viz obrázek níže, kde lze vidět aktuální nastavení konfiguračních registrů.

Address	Name	Value	Field	Option	Category	Setting
8007	CONFIG1	FFFF	FOSC	ECH	Oscillator Selection	ECH, External Clock, High Power Mode (4-32 MHz): device clock supplied to CLK...
			WDTE	ON	Watchdog Timer Enable	WDI enabled
			PWRT	OFF	Power-up Timer Enable	PWRI disabled
			MCLR	ON	MCLR Pin Function Select	MCLR/VPP pin function is MCLR
			CP	OFF	Flash Program Memory Code Protection	Program memory code protection is disabled
			CPD	OFF	Data Memory Code Protection	Data memory code protection is disabled
			BOREN	ON	Brown-out Reset Enable	Brown-out Reset enabled
			CLKOUTEN	OFF	Clock Out Enable	CLKOUT function is disabled. I/O or oscillator function on the CLKOUT pin
			IESO	ON	Internal/External Switchover	Internal/External Switchover mode is enabled
			FCMEN	ON	Fail-Safe Clock Monitor Enable	Fail-Safe Clock Monitor is enabled
8008	CONFIG2	FFFF	WRT	OFF	Flash Memory Self-Write Protection	Write protection off
			PLLEN	ON	PLL Enable	4x PLL enabled
			STVREN	ON	Stack Overflow/Underflow Reset Enable	Stack Overflow or Underflow will cause a Reset
			BORV	LO	Brown-out Reset Voltage Selection	Brown-out Reset Voltage (Vbor), low trip point selected.
			LVP	ON	Low-Voltage Programming Enable	Low-voltage programming enabled

Obrázek.39: Výpis konfiguračních registrů použitého PIC16

Další podpůrnou vrstvou jsou konfigurace, které mohou být přímo v hlavičkových souborech, velmi často implementována jako makra, popřípadě konfigurace může být doplněna měnitelnými parametry načítanými z EEPROM po každém resetu MCU, tak jako v našem případě. Viz kapitola níže zabývající se konfigurací senzoru.

Implementačně nejrozsáhlejším blokem obvykle bývá aplikační blok. Zde jsou naprogramovány funkce na vyšší úrovni, využívající podporu ostatních bloků.

Posledním zmiňovaným blokem je bootloader. Bootloader bývá implementován pouze v určitých případech z důvodu možnosti přeprogramovat aplikační SW v MCU bez nutnosti přímého přístupu k MCU (standardně používá komunikační sběrnici jako například UART, Ethernet, CAN, SPI a podobně). V našem případě není bootloader implementován, protože zařízení má fyzicky dostupné programovací piny přímo na DPS. Bootloader se využívá spíše u projektů, kde integrace do vyššího systému mechanicky zabraňuje použití standardní programovací vybavení od výrobce MCU (například u senzoru vlisovaného přímo do plastového obalu).

5.2 Požadavky na aplikační SW senzoru

Již v předchozích kapitolách byly definovány jednotlivé SW požadavky. Tyto samostatné jednotlivé požadavky je nezbytné analyzovat tak, aby je bylo možné zapracovat do jediného SW. Pro rekapitulaci, zde jsou jednotlivé požadavky:

- p1- „STANDARD“ pracovní režim – běžný uživatelský režim, nejčastější režim senzoru
- p2 - „DIAGNOSTIKA“ režim – pro kontinuální měření v reálném čase
- p3 - „SERVIS“ režim – konfigurace parametrů, vyčítání diagnostických záznamů
- p4 - „TEST“ režim – test HW, interní diagnostika, komunikace s testerem
- p5 - Obsluha kapacitních spínačů – nízkourovňový driver pro obsluhu spínačů

-
- p6 - Nízký stav baterie – hlídání stavu baterie
 - p7 - Parametrizace – zpracování parametrů z EEPROM paměti pro ostatní rutiny senzoru
 - p8 - Autokalibrace – automatické naměření a zpracování limitů pro dané okno
 - p9 - Autokorekce offsetu načtení základní polohy
 - p10 - „Černá skříňka“ – záznamy o provozu, počítadla, poslední 3 měření, provozní data
 - p11 - Automatický přechod do zabezpečeného stavu po „30“ hodinách

V následujících kapitolách je možno vidět takové zpracování jednotlivých SW požadavků do vývojového diagramu, konfigurační tabulky, výstupů diagnostiky a podobně.

5.2.1 Vývojový diagram chování SW

Na níže uvedeném obrázku je vývojový diagram chování pracovního režimu „STANDARD“ dle požadavku p1. Tento vývojový diagram se skládá ze čtyř základních bloků. První blok „První spuštění“ se provede pouze jednou po zapnutí senzoru vložením napájecí baterie. V tomto bloku je řešena problematika testu stavu baterie dle požadavku p6. Dále je v tomto bloku implementováno načtení základní polohy pro XYZ u následně zavřeného okna pomocí identifikace dotyku na ovládacích dotykových plochách s přechodem do módu „ZABEZPEČENO“ – spuštění odpočtu.

Následuje blok implementace nejčastěji používaného režimu „ZABEZPEČENO“. V tomto bloku dochází cyklicky opakovanému měření aktuálních hodnot magnetické indukce na osách XYZ a jejich porovnávání se stanovenými limity. V případě překročení definovaných limitů přechází program do bloku obsluhující alarmní události. Tento blok řeší obsluhu možnosti deaktivace poplachu, který ještě spuštěn nebyl, dále řeší obsluhu vlastního akustického poplachu s možností jeho deaktivace.

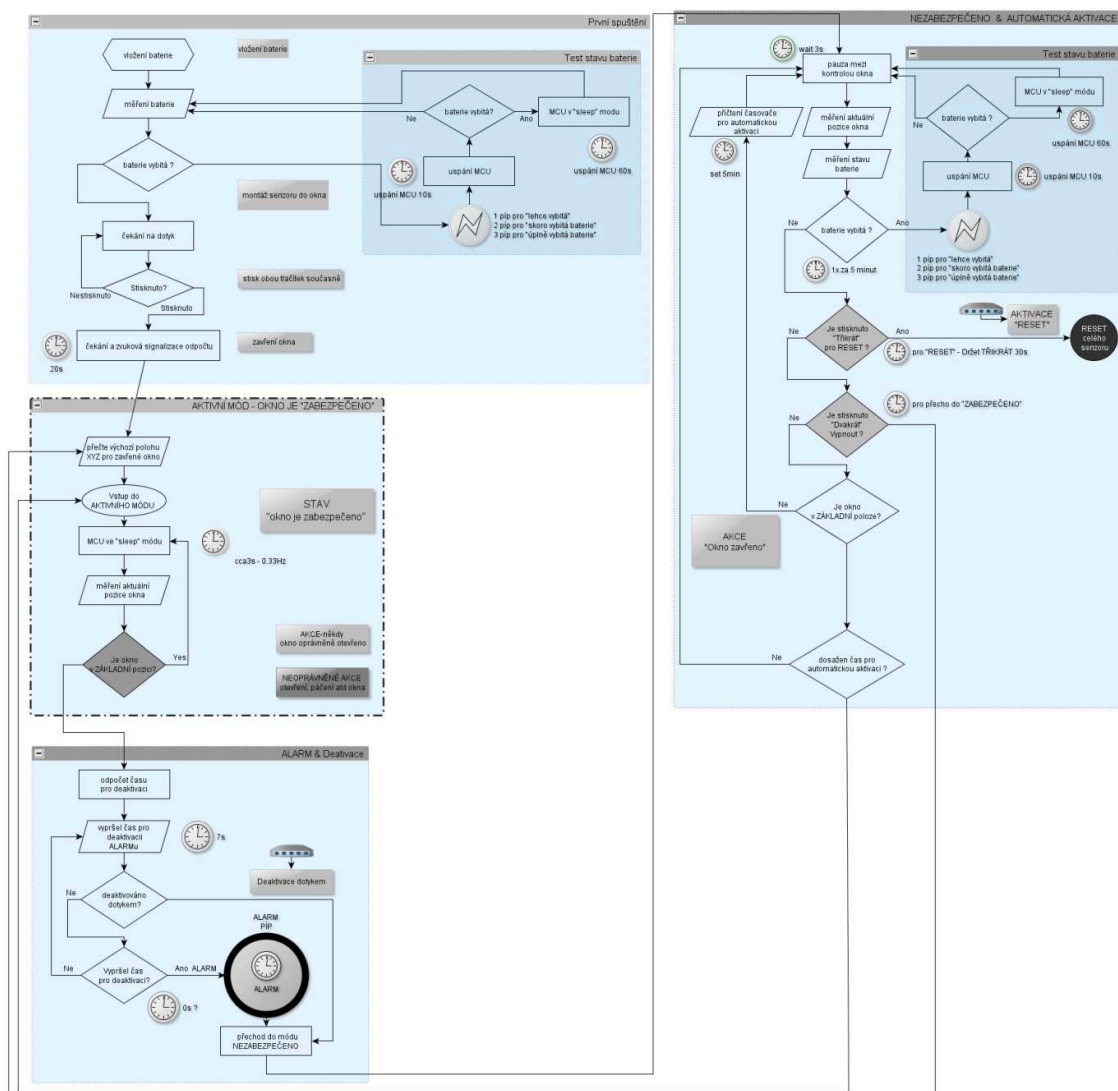
Následuje blok obsluhy stavu „NEZABEZPEČENO“. Tento blok nabízí možnost opětovné aktivace senzoru do stavu „ZABEZPEČENO“, měření aktuálního stavu baterie. V případě překročení limitu času pro automatickou aktivaci, která je přibližně 30 hodin, dochází k automatickému přechodu do stavu „ZABEZPEČENO“.

Implementace požadavku na režim „DIAGNOSTIKA“ je řešena vyhodnocením parametru v EEPROM paměti. V případě správného parametru (dle později popsané tabulky parametrů) je spuštěn režim „STANDARD“ nebo režim „DIAGNOSTIKA“. Režim „DIAGNOSTIKA“ spočívá v cyklickém měření hodnot XYZ s frekvencí měření 5Hz a následném odesílání dat po UART lince ven ze senzoru. Tento režim byl implementován především z důvodu systémových měření a ověřování celé koncepce senzoru. Tento režim není zákazníkem nikdy užíván, jedná se o skrytou funkci.

V předchozích odstavcích jsme na pozadí užívali mnoho konfigurovatelných parametrů. Tyto parametry nejsou uloženy v programové paměti flash spolu s programem, ale jsou uloženy v paměti EEPROM. Základním důvodem pro umístění parametrů mimo programový kód je požadavek na změny chování senzoru v určitém definovaném rozmezí bez potřeby měnit vlastní program. Pro tyto účely je v programu senzoru implementován mód „SERVIS“. Tento mód řeší obsluhu UART rozhraní a poskytuje vnějšímu světu komunikační rozhraní s příkazy jako: Zapiš byte, přečti byte, vyčti paměť, resetuj, vyčti diagnostiku a podobně. I tento režim je zákazníkovi skryt a slouží pouze pro servisní, diagnostické a vývojové potřeby.

V rámci celé implementace senzoru byly samozřejmě řešeny i ostatní definované požadavky, ve většině případů se jednalo o podpůrné funkce pro obsluhu dotykové klávesnice, měření napájení, korekce offsetu, autokalibrace či automatického ukládání diagnostických dat. Tyto funkce jsou spíše podpůrného charakteru a nejsou v základním vývojovém diagramu z důvodu zachování abstrakce

popisu základních vlastností. Detailní implementaci lze verifikovat přímo v příloženém zdrojovém kódu – viz přílohy.



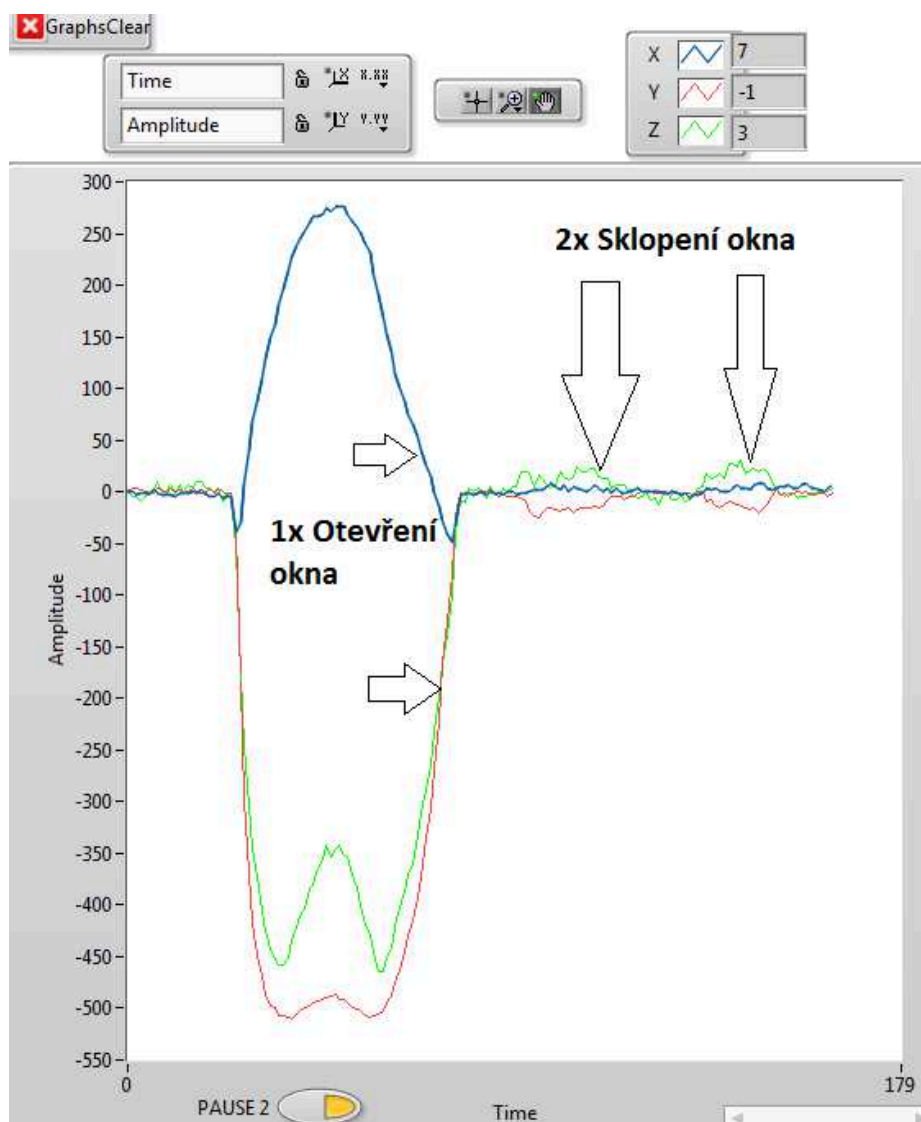
Obrázek.40: Základní vývojový diagram chování senzoru

5.2.2 Automatická kalibrace senzoru

Celá problematika kalibrace senzoru na dané konkrétní okno vychází z faktu, že každé okno i jeho okolí je z pohledu stavu okolního pole magnetické indukce unikátní. Z tohoto důvodu je velmi obtížné stanovit generálně pro všechny senzory jednotné parametry pro vyhodnocování stavu okna v souvislosti s identifikací jeho mechanické manipulace. Na níže uvedeném obrázku můžeme vidět příklad charakteristiky okna (průběhy mag.indukce v návaznosti na mechanickou manipulaci s oknem). Jednotlivé amplitudové hodnoty charakteristiky jsou naměřené absolutní odchylky od absolutních hodnot mag. indukce při zavřeném okně. Tyto hodnoty jsou pro potřeby naší charakteristiky v jednotlivých osách XYZ považovány za výchozí, tedy $X, Y, Z = 0$.

Na níže uvedeném obrázku vidíme nejprve průběh změn mag. indukce v návaznosti na otevření okenního křídla o 90° . V tomto případě jsou hodnoty pro osu X vysoce v plusových hodnotách až okolo +280 oproti základní poloze. Oproti tomu hodnoty Y a Z jsou s opačným znaménkem okolo -500. Následně jsou vyneseny hodnoty pro okno sklopené. Vynesené hodnoty jsou mnohem nižší. V řádu desítek.

Smyslem autokalibrace je naměřit tyto průběhy hodnot během manipulace s oknem a následný výpočet limitních hodnot pro pozdější vyhodnocování poplachu. V rámci autokalibrace jsou měřeny pouze hodnoty pro sklopené křídlo a hodnoty jsou vypočteny jako minimálně dvojnásobek naměřené hodnoty přičemž minimální absolutní hodnota je parametricky definována – defaultní hodnota je nastavena 40. Viz předchozí kapitoly. Autokalibraci je možno spustit dlouhým (asi 10sec.) podržením dotykových spínačů v režimu nezabezpečeno s následným potvrzením v časovém okně 1s dalším dotykem. Je spuštěn akustický odpočet, během kterého má být okno zavřeno, následně se změní tón a frekvence akustického doprovodu. Během něj se má okno otevřít jen na ventilaci cca na 2 – 4 sekundy a následně zavřít. Senzor automaticky provádí měření a naměřená data dle výše uvedených pravidel vyhodnotí. Vyhodnocená data – limity pro poplach os XYZ zapíše automaticky do EEPROM. Z důvodu diagnostiky jsou samotná naměřená data také uložena do EEPROM pro další případnou analýzu.



Obrázek.41: Příklad charakteristiky průběhu mag. indukce okna při manipulaci

5.2.3 Parametry a diagnostická data senzoru v EEPROM paměti

Součástí MCU je několik různých typů pamětí. Pro ukládání konfiguračních parametrů a diagnostických dat se obvykle využívá paměť typu EEPROM. V níže uvedené tabulce lze vidět ukázkou rozdělení a využití jednotlivých částí EEPROM paměti. Výpis celé EEPROM paměti lze vidět v tabulce, která je součástí příloh. Dle barevného značení je velmi jednoduché identifikovat, k jakému účelu jsou jednotlivé záznamy využívány.

Zeleně označené buňky jsou určeny k ukládání konfiguračních parametrů. Tyto parametry jsou obvykle nastaveny pouze jednou při výrobě senzoru. Jedná o nastavení jako: počty měření pro prvotní načení základní polohy, vypnutí či zapnutí kalibrací, počty pípnutí v jednotlivých situacích a podobně.

Záznamy červeným písmem je možné vidět údaje, které jsou automaticky ukládány různými diagnostickými funkcemi implementovanými přímo v programu senzoru. Jedná se o záznamy jako: poslední známá hodnota stavu baterie, různá počítadla počtu aktivací, deaktivací. Taktéž se ukládají hodnoty posledních tří událostí při překročení bezpečnostních limitů.

V modře označených záznamech jsou uloženy hodnoty charakteristiky magnetické indukce pro jednotlivé osy XYZ při autokalibraci na dané okno.

Veškeré záznamy v EEPROM paměti je možno číst či zapisovat prostřednictvím „Produkčního módu“, který je popsán níže.

legenda:
parametr - tovární nastavení
<i>záznam diagnostiky</i>
<i>záznam autokalibrace</i>
<i>nepoužito-rezerva</i>

ADR.	Název makra v C kódu	výchozí hodnota	popis parametru - záznamu
0x 00	FIRSTUSE		0x00 - vymaže EEPROM, 0x01 - použije parametry z EEPROM, 0x02 spustí režim diagnostiky
0x 01	CNT_MEAS_BASIC_POSITION	3	počet měření při určení základní polohy - maximálně 10
0x 02	MAG_CTRL_REG1_SLEEP_MEASURE		0b11101001 - <i>ing.staví</i> registr MAG3110_CTRL_REG1 zapnutí MAG3110 31Hz 8.6uA 32 vzorků
0x 03	<i>nepoužito-rezerva</i>		definovat
0x 04	ZERO_CALIBRATION	1	0x01 - ON <i>automatic</i> ZERO kalibraci, ostatní hodnoty: OFF ZERO kalibraci
0x 05	AUTOCALIBRATION_COUNTER		0xFF-nikdy nekalibrováno, počítadlo spuštění <i>autokalibrace</i> 01 - 254
0x 06	DIAG_INFO_FLAG	0	0x01 - ONLINE odesílání naměřených hodnot, <i>other</i> - not sending measured values by secure state.
0x 07	CNT_BEEP_COUNTDOWN_SECURE	8	počet pípnutí při odpočtu
0x 08	CNT_BEEP_COUNTDOWN_ALARM	8	počet pípnutí při odpočtu před alarmem
0x 09	CNT_BEEP_ALARM	10	počet pípnutí <i>ALARMu</i>
0x 0A	ENABLE_AUTOCALIBRATION_SECURE_XYZ	1	povolení / zakázání funkce <i>autokalibrace</i>
0x 0B	AUTOCALIBRATION_SECURE_XYZ_MINIMUM	40	minimální definovaná hodnota pro výpočet limitu pro X Y Z
0x 0C	<i>VBAT_STATUS_LAST_GOTO_SECURE</i>		<i>stav baterie pokud je nad limitem (výchozí 1.00V - 1100_255 - 0x64 hex)</i>
0x 0D	<i>nepoužito-rezerva</i>		
0x 0E	<i>nepoužito-rezerva</i>		
0x 0F	<i>nepoužito-rezerva</i>		
0x 10	<i>nepoužito-rezerva</i>		
0x 11	X_PLUS_MSB	0	X_PLUS <i>max value</i> - MSB - high byte - nastaveno při <i>autokalibraci</i>

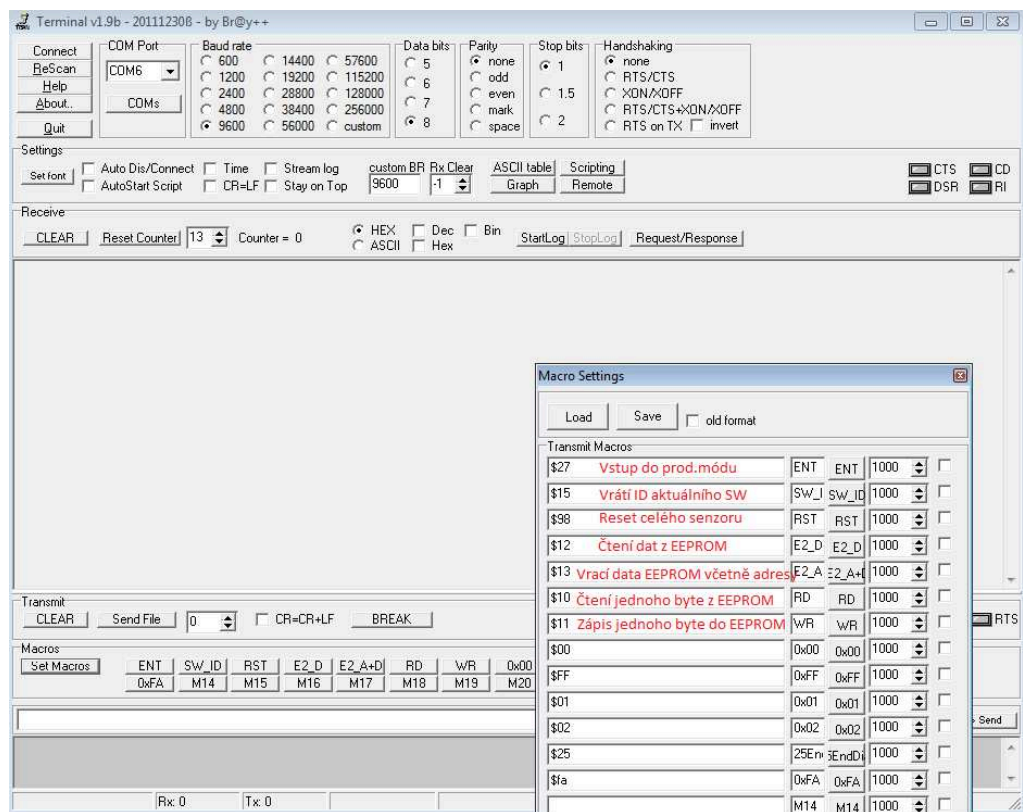
Tabulka.3: EEPROM parametry – ukázka části tabulky

5.2.4 Produkční mód a komunikace senzorem

Většina vestavěných zařízení nemá standardní ovládací prvky jako klávesnici, myš, popřípadě monitor pro zobrazování komunikace jak je zvykem například u PC. Na druhou stranu je velmi často žádoucí mít možnost zařízení různě parametrizovat, popřípadě zjišťovat jeho aktuální stav či přečíst již dříve pořízená data o jeho provozu. Z tohoto důvodu se do většiny vestavěných zařízení integrují i funkce pro obsluhu komunikace. V našem případě se jedná o implementaci sériové komunikace UART dle platných standardů. Na platném standardu je implementován vlastní protokol s následujícími příkazy:

<i>příkaz</i>	<i>kód</i>	<i>adresa</i>	<i>data</i>	<i>příkaz z PC</i>	<i>odpověď senzoru</i>	<i>chování</i>
čti byte	0x10	X	-	0x10 0x40	0xFF	přečte byte z adresy 0x40 a vrátí hodnotu, například 0xFF
zapiš byte	0x11	X	X	0x11 0x40 0x20		zapiše hodnotu 0x20 na adresu 0x40
čti celou EEPROM	0x12	-	-	0x12	0xFF 0x27 0x17 0x68 0xD4	přečte a vrátí obsah celé EEPROM paměti
čti celou EEPROM s adresou	0x13	-	-	0x13	0x00 0xFF 0x01 0x27 0x02 0x17. . .	přečte a vrátí obsah celé EEPROM paměti s adresou v EEPROM
přečti data autokalibrace	0x14	-	-	0x14	0x58 0x8D 0x97 0xD2 0xB8 . . .	přečte a vrátí data autokalibrace
přečti SW verzi	0x15	-	-	0x15	0x0F - freeze, 0x0E - release - příklad: verze 1.06 ... 0x01 0x06	Přečte a vrátí aktuální verzi SW
Reset	0x98	-	-	0x98		provede ihned RESET senzoru - vhodné pro ukončení produkčního módu

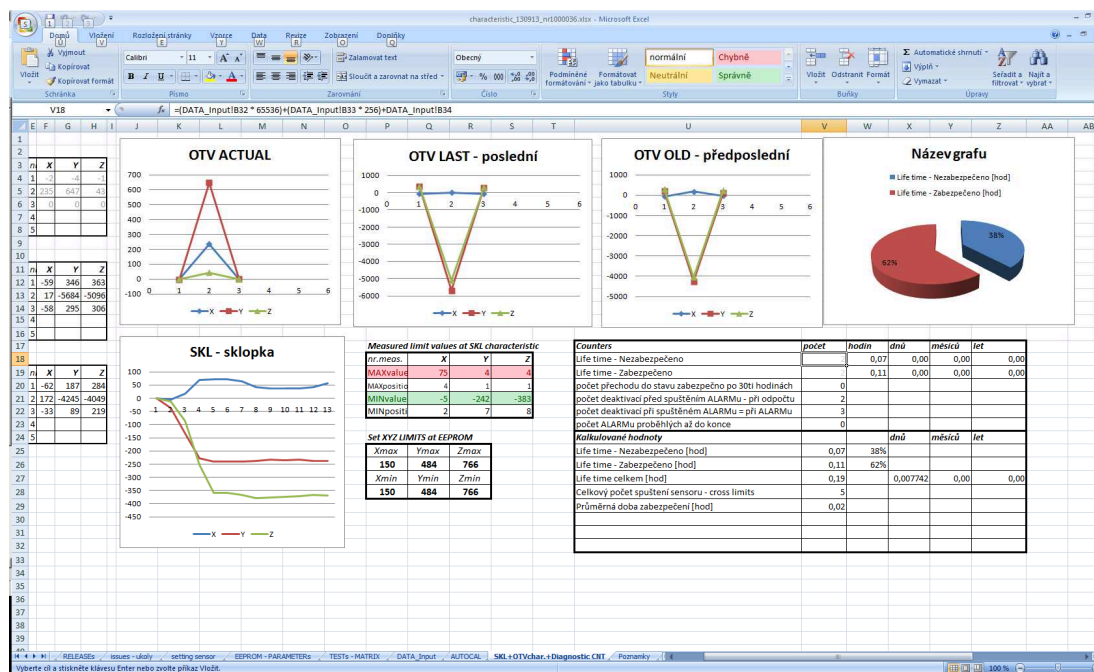
Tabulka.4: Příkazy produkčního módu



Obrázek.42: Ukázka použití produkčního módu přes terminál UART

5.2.5 Diagnostika

V rámci produkčního módu se dají vyčíst ze senzoru i diagnostické záznamy. Na následujícím obrázku je jednoduchý nástroj vytvořený v excelu pro jejich vizualizaci. Můžeme zde vidět tři poslední případy překročení vyhodnocovaných limitů, charakteristiku naměřenou při autokalibraci, vypočtené hodnoty limitů pro kladnou i zápornou polorovinu magnetické indukce pro jednotlivé osy X Y Z. Taktéž zde můžeme sledovat počítadla času stráveného v jednotlivých režimech i počítadla jednotlivých událostí. Tato diagnostika je velmi užitečná při zpětných analýzách senzorů, které mohou být zpět vráceny uživatelem zařízení.



Obrázek.43: Zpracovaná diagnostická data z EEPROM

5.2.6 Programování v jazyce C

Veškerý předchozí popis implementace SW se zakládal na více abstraktním pohledu. Nicméně celý SW je napsán v jazyce C ANSI. V roce 1983 sestavila organizace American National Standards Institute (ANSI) komisi, jejímž úkolem bylo vytvořit „bezspornou a strojově nezávislou definici jazyka C“, která by zachovávala původní myšlenky jazyka. Výsledkem byl standard ANSI C. Americký národní standard jazyka C byl v USA v roce 1990 stažen a nahrazen mezinárodním standardem ISO/IEC 9899-1990, dnes běžně označován jako C90.[7] I v našem případě je použit C90.

Kompletní zdrojový kód je k dispozici na příloženém CD. Níže můžeme vidět ukázkou implementace SW v použitém jazyce C, tak jak byl použit pro implementaci funkcionality navrhovaného senzoru.

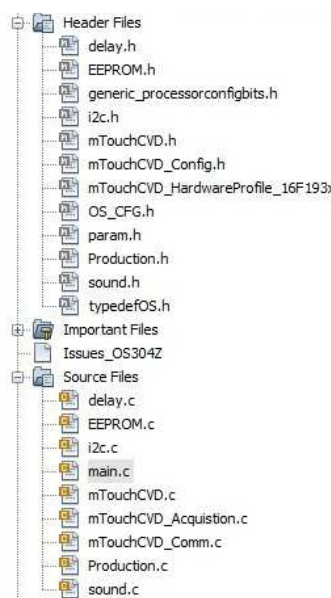
Ukázka implementace SW:

```
UART_send_byte (ACK_PROD_MODE); //return "ACK" - OK enter_to_prodmode
production_mode_status = true; //true - in PM, false - end PM
while(production_mode_status)
{
    //commands - read_byte(0x10), write_byte(0x11),
    read_all_E2P(0x12), end_prod_mode(0x99)
    production_command = 0x00; //null of USART command
    if (PIR1bits.RCIF == 1) production_command = UART_read_byte ();

    switch(production_command)
    {
        case 0x00 : //NO command
            {
                break;
            }
        case 0x10 : //read_byte
            {
                while (PIR1bits.RCIF == 0) {} //wait new byte at USART
                production_adr = UART_read_byte ();
                production_dat = my_eeeprom_read(production_adr);
                UART_send_byte (0x10);
                UART_send_byte (production_adr);
                . . . . . }
    }
```

5.2.7 Zdrojové soubory projektu v jazyce C

Veškerý zdrojový kód je organizován v několika souborech *.c a *.h s ohledem na definovanou architekturu v předchozích kapitolách. Taktéž je kód rozdělen do jednotlivých souborů dle jeho funkce.

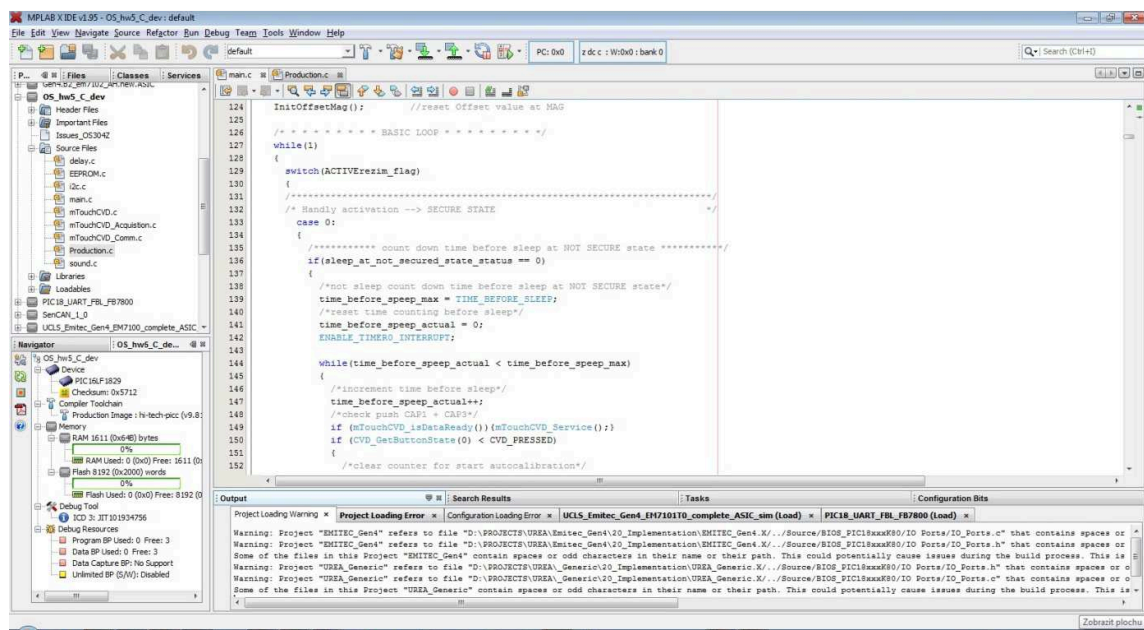


Obrázek.44: Zdrojové soubory

Hlavní část aplikační vrstvy je implementována v `main.c`. V tomto modulu je implementována hlavní část kódu řídící základní chování celého senzoru. Podpůrné funkce aplikačního bloku je možné vidět v modulech `delay.c`, `sound.c`, `Production.c`. Základní HW funkce senzoru jsou zajišťovány prostřednictvím modulů `EEPROM.c`, `i2c.c`, `mTouchCVDxx.c`. Mnohé konfigurační data jsou implementována v jednotlivých *.h souborech. Další skupina konfigurační dat je poskytována z paměti EEPROM, což bylo popsáno v předchozích kapitolách.

5.2.8 Vývojové prostředí MPLABX a debugger ICD3

V předchozích kapitolách byla popisována implementace SW v různých úrovních abstrakce. Určitě za zmínku stojí ukázat konkrétní vývojové nástroje. Vzhledem k použití MCU PIC16 od společnosti Microchip, byl k vývoji a ladění aplikačního SW použit nástroj MPLAB X IDE ve verzi 1.95. Na trhu je k dispozici několik použitelných vývojových prostředí, nicméně z důvodu dostupnosti bylo použito prostředí přímo od dodavatele MCU. V levé horní části obrázku je k dispozici správa souborů projektu, v levé dolní části můžeme vidět mnoho různých parametrů souvisejících s projektem, hlavní okno je samozřejmě věnováno editoru zdrojového kódu. Ve spodní části je výstup terminálu pro kompilaci, debugging a mnoho dalších komunikačních oken. Pro kompilaci zdrojového kódu byl použit kompilátor HI-TECH PICC ve verzi 9.81.



Obrázek.45: Vývojové prostředí MPLAB X IDE v 1.95

Vzhledem k tomu, že je nezbytné programovat přímo flash v MCU bylo nutné použít i HW nástroje, které zajišťují přímé propojení mezi MPLAB X a cílovým MCU. Pro tyto účely byl vybrán programátor ICD3, který slouží zároveň i jako debugger. Vlastní HW provedení vidíme na následujícím obrázku.



Obrázek.46: Programátor a debugger ICD3 od společnosti Microchip

6 Ověření funkčnosti a vlastností realizovaného senzoru

Testování SW je v dnešní době taktéž samostatná disciplína. V dřívějších kapitolách bylo prostřednictvím jednotlivých požadavků poměrně detailně definováno požadované chování senzoru. V průmyslové vývojové praxi sensorové techniky se testování velmi často rozděluje do tří základních skupin. Provádí se testy softwarové, hardwarové a systémové. V podstatě jde o to, aby každý jeden požadavek byl pokud možno 100% testovatelný. Vždy není možné otestovat všechny požadavky 100%, za vyhovující se považuje 85% testovatelnosti všech požadavků.

6.1 Testování HW senzoru

Testování HW probíhalo především měřeními na třech různých kusech senzoru. Vzhledem k technickým možnostem bylo možné některé parametry změřit a otestovat pouze v omezeném rozsahu.

<i>id Testu</i>	<i>Popis</i>	<i>výsledek</i>
HWTC_10	napájecí napětí 1V – 1,6V, měnič na 3.3V, I _{max} > 150mA, ztrátový proud < 40μA ()	OK v plném rozsahu
HWTC_20	dlouhodobá průměrná spotřeba < 100μA při frekvenci měření min. 0,3Hz (průměr >60uA)	OK v plném rozsahu
HWTC_30	2x kapacitní spínač (testováno 5-ti osobami)	OK v plném rozsahu
HWTC_40	microUSB - UART + 5V dobíjení (testovaná komunikace na 9600kbps, dobíjení testováno 2x adaptér)	OK v plném rozsahu
HWTC_50	LED indikátor (optická kontrola)	OK v plném rozsahu
HWTC_60	akustický výstup > 80db (pouze indikačně, neměřeno)	OK
HWTC_70	měření magnetického pole ve všech třech osách X, Y, Z	OK
HWTC_80	citlivost min. ≤ 0,1μT (neměřeno – převzato z katalogového listu)	OK
HWTC_90	měřicí rozsah ± 1000μT (neměřeno – převzato z katalogového listu)	OK
HWTC_100	rozsah teploty prostředí -30°C ÷ +70°C. (ověřeno v rozsahu -15°C ÷ +50°C)	OK

Tabulka.3: HW testy

6.2 Testování aplikačního SW senzoru

Seznam provedených SW testů je uveden v následující tabulce. Tato tabulka je souhrn jednotlivých testů.

<i>id Testu</i>	<i>Popis</i>	<i>výsledek</i>
TC_10	Autokorekce nulové hodnoty XYZ	OK
TC_20	Kapacitní dotykové ovládání	OK
TC_30	XYZ alarm limity [0 . . . 9999]	OK
TC_40	Automatický přechod po 30h. do stavu zabezpečeno	OK
TC_50	Autokalibrace VYP./ZAP.	OK
TC_60	Autokalibrace – kalkulace MAX/MIN limitů	OK
TC_70	Optimalizace velkého start offsetu	OK
TC_80	Měření baterie	OK
TC_90	OTV charakteristika --> EEPROM	OK
TC_100	Mazání OTV+SK OBLAST EEPROM po nastavení 0xFF	OK
TC_110	Test diagnostiky	OK
TC_120	Délka ALARMU 10-->15, odpočet před ALARMem 10-->5	OK
TC_130	Produkční mód - všechny příkazy	OK

Tabulka.4: Seznam SW testů

Každý test bývá obvykle definován ve formální podobě. Na následujícím obrázku je uveden příklad definice jednoho testu. Kromě formální hlavičky definice obsahuje především počáteční podmínky, popis vlastní testovací procedury, očekávané výsledky a především reálný výsledek testu.

Číslo testu: TC_30	Provedení testu: Manuální	Výsledek testu: TEST OK
Název testu: XYZ alarm limity [0 . . . 9999]	Testovací prostředí: Senzor – Komunikátor - PC	
Předcházející podmínky: <ul style="list-style-type: none">- Nainstalovat senzor do okna, připojit PC se serial monitorem na správném COM portu- V EEPROM nastavit na adrese 0x06 hodnotu 0x01 – zapnutí funkce odesílání naměřených dat- V EEPROM nastavit pro XY Z plus i minus hodnoty na 5000 – HEX - MSB 0x13 LSB 0x88POZOR na změny adres v EEPROM díky dvoubajtovému nastavování limitů- RESET senzoru		
Další vstupy testu: . . .		
Testovací procedura: <ol style="list-style-type: none">1. Nastavit X plus limit – 578 - HEX – MSB 0x02 LSB 0x422. Spustit odpočet základní polohy – sledovat aktuálně naměřená dat na SERIAL MONITORU3. Měnit magnetické pole v okolí senzoru pro postupné překročení nastaveného limitu v testované ose <p>Test postupně opakovat pro všech 6 limitů, a hodnoty 578 a 195, a dva různé kusy senzorů – celkem 6x2x2 = 24 testů</p>		
Následné podmínky: . . .		
Očekávané výsledky: <ol style="list-style-type: none">1. Zkontrolovat v EEPROM dle adresace v OS_PARAM_1.02 – hodnoty 578 - HEX - MSB 0x02 LSB 0x422. Při nepřekročení nastavené hodnoty není spuštěn ALARM3. Při překročení nastavené hodnoty JE spuštěn ALARM – pozor překročovat jen testovanou hodnotu, například Y minus <ul style="list-style-type: none">- Očekáváme shodné chování u obou dvou senzorů jak pro hodnoty do 255 – v našem případě 195 – tak pro hodnoty nad 255 – v našem případě 578		
Reálný výsledek testu: <ol style="list-style-type: none">1. Hodnoty v EEPROM u obou senzorů 578 - HEX - MSB 0x02 LSB 0x422. Při nepřekročení nastavených hodnot NEBYL spuštěn ALARM3. Při překročení nastavených hodnot byl u obou senzorů SPUŠTEN ALARM4. V reálu bylo chování u obou senzorů shodné tak jak bylo očekáváno		
VÝSLEDEK TESTU: OK		

Obrázek.47: Ukázka formální definice testu

Testování HW a SW je základní podmínkou pro správnou činnost celého systému. Je nutno podotknout, že některé testy odhalily aplikační chyby, které byly následně opraveny a testy zopakovány znovu na nové verzi SW. Bohužel nebylo možné tak jako v praxi přenechat testování na jiné osobě, která provede testy bez ohledu hlubší znalost vnitřní struktury SW, což je vždy lepší. V našem případě byly postupně provedeny všechny testy s pozitivním výsledkem.

Po testování SW byly provedeny testy na úrovni celého systému, které mohou odhalit další problémy již ve fázi návrhu senzoru.

6.3 Systémové testování senzoru

Systémové testy byly provedeny ověřením chování přímo v okně. Byly provedeny nezávisle dvěma osobami na několika oknech ve dvou lokalitách. Všechny testy, proběhly v pořádku. Senzor tímto můžeme považovat za otestovaný.

Z praxe ale víme, že je potřeba vyrobít ověřovací sérii nejlépe několika set kusů a tyto nechat reálně používat definované skupině uživatelů. Mohou se projevit komplikace, které se u malého počtu vzorků ze statistických důvodů neprojevili. Následně potom odhalit příčinu problému, a všechny jednotlivé druhy testů zopakovat dokud problémy nezmizí. Doporučuje se zavádět výrobek do sériové výroby až po takto důkladně provedených testech. Součástí takových sofistikovaných testů je také testování výrobních a dalších podpůrných procesů, které vstupují do výroby zařízení.

6.4 Shrnutí výsledků testů

Pro potřeby této práce můžeme testy považovat za dostatečné a senzor za naprosto funkční, plní svoji funkci a vyhovuje zadaným požadavkům.

7 Zhodnocení dosažených výsledků

Úkolem této práce bylo vyvinout mikroprocesorově řízený zabezpečovací senzor pracující na principu vyhodnocování slabých magnetických polí včetně hardware, software, i mechanického provedení, tak aby senzor plnil svoji funkci pro zvýšení zabezpečení okna upozorněním na neoprávněnou manipulaci.

Musím říct, že celá problematika byla poměrně komplikovaná především z důvodu limitů v požadavku na nízkou spotřebu zařízení a jeho atypických mechanických rozměrů. Vyvinutý senzor je ihned aplikovatelný do praxe, protože výstupem práce je v podstatě kompletní výrobní dokumentace i aplikační SW. Senzor byl testován sadou HW testů, SW testů a také systémovými testy na několika plastových oknech běžné konstrukce. Předpokládám, že po SW kalibraci by bylo možno vyvinutý senzor použít i v oknech dřevěných či hliníkových. Z hlediska dalšího vývoje se otevírají možnosti integrovat do senzoru modul bezdrátové komunikace, případně používat tento senzor v celém systému včetně centrální jednotky, která by mohla zajistit oboustrannou komunikaci s uživatelem například prostřednictvím internetu, ovládacího panelu a podobně.

Jsem přesvědčen, že závěrečné testování prokázalo, že senzor plní svoji funkci bezproblémově, čímž bylo ve všech ohledech dosaženo cílů práce. Práce byla velmi zajímavá především z důvodu vytvoření nového samostatného zařízení, které ještě není k dispozici na trhu.

Použitá literatura

- [1] VAN SICKLE, Ted.[i] Programming microcontrollers in C.[/i] 2nd ed. Eagle Rock, Calif.: LLH Technology Pub., c2001, 454 s. ISBN 1-878707-57-4.
- [2] FREESCALE SEMICONDUCTOR. [i]Freescale semiconductor[/i] [online]. 2012 [cit. 2012-02-29]. Dostupné z: <http://www.freescale.com>
- [3] ĎAĎO, Stanislav. *Senzory a měřící obvody*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996, 315 s.
- [4] HAŇKA, L. *Teorie elektromagnetického pole*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1982, 218 s.
- [5] MICROCHIP. *PIC16(L)F1825/1829 Data Sheet* [online]. [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: www.microchip.com
- [6] FREESCALE SEMICONDUCTOR: MAG3110 datasheet. [online]. [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MAG3110.pdf
- [7] KERNIGHAN, Brian. Programovací jazyk C. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2006, 286 s. ISBN 80-251-0897-X.
- [8] TME: LD-BZEN-0903. [online]. [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/details/ld-bzen-0903/elektromag-signalizatory-bez-generatoru/loudity/#>
- [9] MOLEX: *Micro USB AB* [online]. [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: http://www.molex.com/molex/products/datasheet.jsp?part=active/0475891001_IO_CONNECTORS.xml
- [10] AME [online]. [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://www.ame.cz/>
- [11] ROTO. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.ROTO-frank.com/>

Seznam příloh

Příloha.A:	Tabulka parametrů a diagnostických dat senzoru v EEPROM paměti.....	I
Příloha.B:	Výpis použitých součástek	V
Příloha.C:	Schéma celého senzoru.....	VI

Součástí BP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

\01_Nahled_Schemata_DPS	- schémata a pohledy na DPS ve formě obrázků
\02_Hardware\KatalogoveListy	- Katalogové listy důležitých součástek
\02_Hardware\OrCAD_data	- Data návrhu schématu a DPS
\03_Software\Release	- Firmware pro MCU senzoru
\03_Software\SW_zdrojoveKody	- Zdrojové kódy firmware v jazyce C ANSI
\04_Fotodokumentace	- Fotodokumentace senzoru a příslušenství

Příloha.A: Tabulka parametrů a diagnostických dat senzoru v EEPROM paměti

legenda:
parametr - tovární nastavení
záznam dignostiky
záznam autokalibrace
nepoužito-rezerva

ADR.	Název makra v C kódu	výchozí hodnota	popis parametru - záznamu
0x 00	FIRST USE		0x00 - vymaže EEPROM, 0x01 - použije parametry z EEPROM, 0x02 spustí režim diagnostiky
0x 01	CNT_MEAS_BASIC_POSITION	3	počet měření při určení základní polohy - maximálně 10
0x 02	MAG_CTRL_REG1_SLEEP_MEASURE		0b11101001 /na staví registr MAG3110 CTRL_REG1 zapnutí MAG3110 0.31Hz 8.6uA 32 vzorků
0x 03	nepoužito-rezerva		definovat
0x 04	ZERO_CALIBRATION	1	0x01 - ON automatic ZERO kalibraci, ostatní hodnoty: OFF ZERO kalibraci
0x 05	AUTOCALIBRATION_COUNTER		0xFF-nikdy nekalibrováno, počítadlo spuštění autokalibrace 01 - 254
0x 06	DIAG_INFO_FLAG	0	0x01 - ONLINE odesílání naměřených hodnot, other - not sending measured values by secure state,
0x 07	CNT_BEEP_COUNTDOWN_SECURE	8	počet pípnutí při odpočtu
0x 08	CNT_BEEP_COUNTDOWN_ALARM	8	počet pípnutí při odpočtu před alarmem
0x 09	CNT_BEEP_ALARM	10	počet pípnutí ALARMu
0x 0A	ENABLE_AUTOCALIBRATION_SECURE_XYZ	1	povolení / zakázání funkce autokalibrace
0x 0B	AUTOCALIBRATION_SECURE_XYZ_MINIMUM	40	minimální definovaná hodnota pro výpočet limitu pro X Y Z
0x 0C	VBAT_STATUS_LAST_GOTO_SECURE		stav baterie pokud je nad limitem (výchozí 1.00V - 110 0.255 - 0x64 hex)
0x 0D	nepoužito-rezerva		
0x 0E	nepoužito-rezerva		
0x 0F	nepoužito-rezerva		
0x 10	nepoužito-rezerva		
0x 11	X_PLUS_MSB	0	X_PLUS_max value - MSB - high byte - nastaveno při autokalibraci
0x 12	X_PLUS_LSB	255	X_PLUS_max value - LSB - low byte - nastaveno při autokalibraci
0x 13	X_MINUS_MSB	0	X_MINUS_max value - MSB - high byte - nastaveno při autokalibraci
0x 14	X_MINUS_LSB	255	X_MINUS_max value - LSB - low byte - nastaveno při autokalibraci
0x 15	Y_PLUS_MSB	0	Y_PLUS_max value - MSB - high byte - nastaveno při autokalibraci
0x 16	Y_PLUS_LSB	255	Y_PLUS_max value - LSB - low byte - nastaveno při autokalibraci
0x 17	Y_MINUS_MSB	0	Y_MINUS_max value - MSB - high byte - nastaveno při autokalibraci
0x 18	Y_MINUS_LSB	255	Y_MINUS_max value - LSB - low byte - nastaveno při autokalibraci
0x 19	Z_PLUS_MSB	0	Z_PLUS_max value - MSB - high byte - nastaveno při autokalibraci
0x 1A	Z_PLUS_LSB	255	Z_PLUS_max value - LSB - low byte - nastaveno při autokalibraci
0x 1B	Z_MINUS_MSB	0	Z_MINUS_max value - MSB - high byte - nastaveno při autokalibraci
0x 1C	Z_MINUS_LSB	255	Z_MINUS_max value - LSB - low byte - nastaveno při autokalibraci
0x 1D	CNT_DIAG_LIVETIME_NOTSECURE	[MasterSB]	u24 [s] 1xcnt... 128sec 64x2sec
0x 1E	CNT_DIAG_LIVETIME_NOTSECURE	[MediumSB]	celkový čas senzoru v režimu Nezabezpečeno
0x 1F	CNT_DIAG_LIVETIME_NOTSECURE	[LowSB]	
0x 20	CNTDIAG_LIVETIME_SECURE	[MasterSB]	u24 [s] 1xcnt... 206,464sec 0.31Hz... 64x3,226sec
0x 21	CNTDIAG_LIVETIME_SECURE	[MediumSB]	celkový čas senzoru v režimu Zabezpečeno
0x 22	CNTDIAG_LIVETIME_SECURE	[LowSB]	
0x 23	CNTDIAG_ACTIVATION_AFTER_TIME_OUT_HOURS	[MSB]	u16
0x 24	CNTDIAG_ACTIVATION_AFTER_TIME_OUT_HOURS	[LSB]	počet aktivací po vypršení časového limitu
0x 25	CNTDIAG_DEACTIVATION_BEFORE_ALARM	[MasterSB]	u24
0x 26	CNTDIAG_DEACTIVATION_BEFORE_ALARM	[MediumSB]	počet deaktivací před spuštěním Alarmu
0x 27	CNTDIAG_DEACTIVATION_BEFORE_ALARM	[LowSB]	
0x 28	CNTDIAG_DEACTIVATION_AT_RUNNING_ALARM	[MSB]	u16
0x 29	CNTDIAG_DEACTIVATION_AT_RUNNING_ALARM	[LSB]	počet deaktivací při spuštění Alarmu
0x 2A	CNTDIAG_FINISH_ALARM	[MSB]	u16
0x 2B	CNTDIAG_FINISH_ALARM	[LSB]	počet proběhlých alarmů až do konce
0x 2C	nepoužito-rezerva		
0x 2D	nepoužito-rezerva		
0x 2E	nepoužito-rezerva		
0x 2F	nepoužito-rezerva		
0x 30	nepoužito-rezerva		
0x 31	nepoužito-rezerva		

0x	32	nepoužito-rezerva		
0x	33	nepoužito-rezerva		
0x	34	nepoužito-rezerva		
0x	35	nepoužito-rezerva		
0x	36	X_OTV_MSB 0 ACTUAL		0..PředPřekročenímLimitu 1..BodPřekročení
0x	37	X_OTV_LSB		2..PrníBodPoPřekročenífirstAfterCross
0x	38	Y_OTV_MSB		3..DruhyBodPoPřekročeníLimitu 4..ČtvrtýBodPoPřekročeníLimitu
0x	39	Y_OTV_LSB		
0x	3A	Z_OTV_MSB		
0x	3B	Z_OTV_LSB		AKTUALNÍ měřená charakteristika
0x	3C	X_OTV_MSB 1		
0x	3D	X_OTV_LSB		
0x	3E	Y_OTV_MSB		
0x	3F	Y_OTV_LSB		
0x	40	Z_OTV_MSB		
0x	41	Z_OTV_LSB		
0x	42	X_OTV_MSB 2		
0x	43	X_OTV_LSB		
0x	44	Y_OTV_MSB		
0x	45	Y_OTV_LSB		
0x	46	Z_OTV_MSB		
0x	47	Z_OTV_LSB		
0x	48	nepoužito-rezerva		
0x	49	nepoužito-rezerva		
0x	4A	nepoužito-rezerva		
0x	4B	nepoužito-rezerva		
0x	4C	nepoužito-rezerva		
0x	4D	nepoužito-rezerva		
0x	4E	nepoužito-rezerva		
0x	4F	nepoužito-rezerva		
0x	50	nepoužito-rezerva		
0x	51	nepoužito-rezerva		
0x	52	nepoužito-rezerva		
0x	53	nepoužito-rezerva		
0x	54	X_OTV_MSB 0 LAST		0..PředPřekročenímLimitu 1..BodPřekročení
0x	55	X_OTV_LSB		2..PrníBodPoPřekročenífirstAfterCross
0x	56	Y_OTV_MSB		3..DruhyBodPoPřekročeníLimitu 4..ČtvrtýBodPoPřekročeníLimitu
0x	57	Y_OTV_LSB		
0x	58	Z_OTV_MSB		
0x	59	Z_OTV_LSB		POSLEDNÍ měřená charakteristika
0x	5A	X_OTV_MSB 1		
0x	5B	X_OTV_LSB		
0x	5C	Y_OTV_MSB		
0x	5D	Y_OTV_LSB		
0x	5E	Z_OTV_MSB		
0x	5F	Z_OTV_LSB		
0x	60	X_OTV_MSB 2		
0x	61	X_OTV_LSB		
0x	62	Y_OTV_MSB		
0x	63	Y_OTV_LSB		
0x	64	Z_OTV_MSB		
0x	65	Z_OTV_LSB		
0x	66	nepoužito-rezerva		
0x	67	nepoužito-rezerva		
0x	68	nepoužito-rezerva		
0x	69	nepoužito-rezerva		
0x	6A	nepoužito-rezerva		
0x	6B	nepoužito-rezerva		
0x	6C	nepoužito-rezerva		
0x	6D	nepoužito-rezerva		
0x	6E	nepoužito-rezerva		
0x	6F	nepoužito-rezerva		
0x	70	nepoužito-rezerva		

0x	71	nepoužito-rezerva		
0x	72	X_OTV_MSB 0_OLD		0..PředPřekročenímLimitu 1..BodPřekročení
0x	73	X_OTV_LSB		2..PrníBodPoPřekročenífirstAfterCross
0x	74	Y_OTV_MSB		3..DruhyBodPoPřekročeníLimitu 4..ČtvrtýBodPoPřekročeníLimitu
0x	75	Y_OTV_LSB		
0x	76	Z_OTV_MSB		
0x	77	Z_OTV_LSB		PŘEDPOSLEDNÍ měřená charakteristika
0x	78	X_OTV_MSB 1		
0x	79	X_OTV_LSB		
0x	7A	Y_OTV_MSB		
0x	7B	Y_OTV_LSB		
0x	7C	Z_OTV_MSB		
0x	7D	Z_OTV_LSB		
0x	7E	X_OTV_MSB 2		
0x	7F	X_OTV_LSB		
0x	80	Y_OTV_MSB		
0x	81	Y_OTV_LSB		
0x	82	Z_OTV_MSB		
0x	83	Z_OTV_LSB		
0x	84	nepoužito-rezerva		
0x	85	nepoužito-rezerva		
0x	86	nepoužito-rezerva		
0x	87	nepoužito-rezerva		
0x	88	nepoužito-rezerva		
0x	89	nepoužito-rezerva		
0x	8A	nepoužito-rezerva		
0x	8B	nepoužito-rezerva		
0x	8C	nepoužito-rezerva		
0x	8D	nepoužito-rezerva		
0x	8E	nepoužito-rezerva		
0x	8F	nepoužito-rezerva		
0x	90	X_SKL_MSB 0 - 1		
0x	91	X_SKL_LSB		Naměřené hodnoty autokalibrace - 25 hodnot XYZ
0x	92	Y_SKL_MSB		
0x	93	Y_SKL_LSB		
0x	94	Z_SKL_MSB		
0x	95	Z_SKL_LSB		
0x	96	X_SKL_MSB 2 - 3		
0x	97	X_SKL_LSB		
0x	98	Y_SKL_MSB		
0x	99	Y_SKL_LSB		
0x	9A	Z_SKL_MSB		
0x	9B	Z_SKL_LSB		
0x	9C	X_SKL_MSB 4 - 5		
0x	9D	X_SKL_LSB		
0x	9E	Y_SKL_MSB		
0x	9F	Y_SKL_LSB		
0x	A0	Z_SKL_MSB		
0x	A1	Z_SKL_LSB		
0x	A2	X_SKL_MSB 6 - 7		
0x	A3	X_SKL_LSB		
0x	A4	Y_SKL_MSB		
0x	A5	Y_SKL_LSB		
0x	A6	Z_SKL_MSB		
0x	A7	Z_SKL_LSB		
0x	A8	X_SKL_MSB 8 - 9		
0x	A9	X_SKL_LSB		
0x	AA	Y_SKL_MSB		
0x	AB	Y_SKL_LSB		
0x	AC	Z_SKL_MSB		
0x	AD	Z_SKL_LSB		
0x	AE	X_SKL_MSB 10 - 11		
0x	AF	X_SKL_LSB		

0x	B0	Y_SKL_MSB		
0x	B1	Y_SKL_LSB		
0x	B2	Z_SKL_MSB		
0x	B3	Z_SKL_LSB		
0x	B4	X_SKL_MSB 12 - 13		
0x	B5	X_SKL_LSB		
0x	B6	Y_SKL_MSB		
0x	B7	Y_SKL_LSB		
0x	B8	Z_SKL_MSB		
0x	B9	Z_SKL_LSB		
0x	BA	X_SKL_MSB 14 - 15		
0x	BB	X_SKL_LSB		
0x	BC	Y_SKL_MSB		
0x	BD	Y_SKL_LSB		
0x	BE	Z_SKL_MSB		
0x	BF	Z_SKL_LSB		
0x	C0	X_SKL_MSB 16 - 17		
0x	C1	X_SKL_LSB		
0x	C2	Y_SKL_MSB		
0x	C3	Y_SKL_LSB		
0x	C4	Z_SKL_MSB		
0x	C5	Z_SKL_LSB		
0x	C6	X_SKL_MSB 18 - 19		
0x	C7	X_SKL_LSB		
0x	C8	Y_SKL_MSB		
0x	C9	Y_SKL_LSB		
0x	CA	Z_SKL_MSB		
0x	CB	Z_SKL_LSB		
0x	CC	X_SKL_MSB 20 - 21		
0x	CD	X_SKL_LSB		
0x	CE	Y_SKL_MSB		
0x	CF	Y_SKL_LSB		
0x	D0	Z_SKL_MSB		
0x	D1	Z_SKL_LSB		
0x	D2	X_SKL_MSB 22 - 23		
0x	D3	X_SKL_LSB		
0x	D4	Y_SKL_MSB		
0x	D5	Y_SKL_LSB		
0x	D6	Z_SKL_MSB		
0x	D7	Z_SKL_LSB		
0x	D8	X_SKL_MSB 24 - 25		
0x	D9	X_SKL_LSB		
0x	DA	Y_SKL_MSB		
0x	DB	Y_SKL_LSB		
0x	DC	Z_SKL_MSB		
0x	DD	Z_SKL_LSB		
0x	DE	X_SKL_MSB_MAX		Nejvyšší naměřené hodnoty autokalibrace - 25 hodnot XYZ - MAX
0x	DF	X_SKL_LSB_MAX		
0x	E0	Y_SKL_MSB_MAX		
0x	E1	Y_SKL_LSB_MAX		
0x	E2	Z_SKL_MSB_MAX		
0x	E3	Z_SKL_LSB_MAX		
0x	E4	X_SKL_MSB_MIN		Nejvyšší naměřené hodnoty autokalibrace - 25 hodnot XYZ - MIN
0x	E5	X_SKL_LSB_MIN		
0x	E6	Y_SKL_MSB_MIN		
0x	E7	Y_SKL_LSB_MIN		
0x	E8	Z_SKL_MSB_MIN		
0x	E9	Z_SKL_LSB_MIN		
0x	EA	X_SKL_POSITION_MEASUREMENT_MAX		
0x	EB	Y_SKL_POSITION_MEASUREMENT_MAX		
0x	EC	Z_SKL_POSITION_MEASUREMENT_MAX		
0x	ED	X_SKL_POSITION_MEASUREMENT_MIN		
0x	EE	Y_SKL_POSITION_MEASUREMENT_MIN		

0x	EF	Z_SKL_POSITION_MEASUREMENT_MIN		
0x	F0	Production data		Možno využiť za výrobní záznamy napríklad:
0x	F1	Production data		výrobní číslo
0x	F2	Production data		číslo šarže
0x	F3	Production data		datum výroby
0x	F4	Production data		verze firmware
0x	F5	Production data		a podobné
0x	F6	Production data		
0x	F7	Production data		
0x	F8	Production data		
0x	F9	Production data		
0x	FA	Production data		
0x	FB	Production data		
0x	FC	Production data		
0x	FD	Production data		
0x	FE	Production data		
0x	FF	Production data		

Příloha.B: Výpis použitých součástek

položka	kusů	označení	hodnota/typ
1	1	držák baterie	AAA battery 1,5V
2	5	FIX1,CAP1,FIX2,CAP2,CAP3	kotvící a dotykové šrouby
3	7	C1,C2,C3,C5,C6,C12,C24	100nF
4	3	C4,C22,C23	1μF
5	1	C7	10μF
6	1	C8	10μF
7	1	D1	LED5mm
8	1	D2	PMEG2010AEJ
9	1	J2	connector
10	1	L1	4,7μH
11	1	P27	PIP/piezo
12	3	R1,R2,R3	560R
13	2	R4,R5	4k7
14	1	R6	1k
15	1	R8	510k
16	1	R9	1M3
17	2	R19,R15	1M
18	1	R18	240k
19	2	T1,T2	NFET-NPX-2N7002PW
20	1	U1	PIC16LF1829
21	1	U2	MAG3110
22	1	U3	MCP1640_DFN

Příloha.C: Schéma celého senzoru

